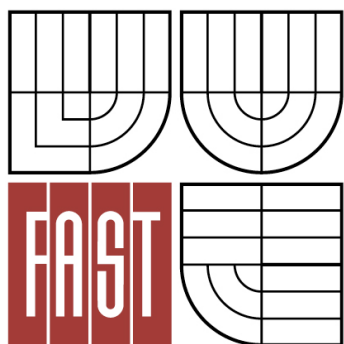




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

BIGOTOVA KŘIVKA JAKO NÁSTROJ PRO POSUZOVÁNÍ VLASTNOSTÍ PLASTICKÉHO TĚSTA

BIGOTS CURVE FOR THE DETERMINATION OF PLASTIC BODY PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTĚCH SUK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. RADOMÍR SOKOLÁŘ, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program
Typ studijního programu
Studijní obor
Pracoviště

B3607 Stavební inženýrství
Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student

Vojtěch Suk

Název

Bigotova křivka jako nástroj pro posuzování
vlastností plastického těsta

Vedoucí bakalářské práce

doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

**Datum zadání
bakalářské práce**

30. 11. 2013

**Datum odevzdání
bakalářské práce**

30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] Hanykýř V., Kutzendörfer J., Technologie keramiky, Vega 2000.
- [2] Sokolář, R. Keramika/Modul BJ01-M01. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, [2006]. 176 s
- [3] Sokolář, R., Smetanová, L. Keramika - laboratoře/Modul BJ02-M01. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, [2006]. 120 s.
- [4] P. Aungtichart, S. Wada. Correlation between Bigot and Ratzenberger drying sensitivity indices of red clay from Ratchaburi province (Thailand). Applied Clay Science. Volume 43, No. 2, 2009, p. 182-185.
- [5] Valenta, L. Keramická příručka. Vydavatelství technické literatury. Horní Maršov 1999.

Zásady pro vypracování

Bigotova křivka je charakteristickou závislostí mezi smrštěním a vlhkostí každé plastické keramické suroviny během sušení. Z Bigotovy křivky je možno stanovit další vlastnosti suroviny, například její citlivost k sušení.

Cílem teoretické části bakalářské práce je popsat historii Bigotovy křivky a uvést typické křivky pro různé druhy jílovinových zemin především z hlediska mineralogického složení. Na základě studia dostupné odborné literatury uveďte vlastnosti plastických keramických surovin, které je možno pomocí Bigotovy křivky stanovit.

V rámci praktické části bakalářské práce se zaměřte na posouzení vlivu vlhkosti plastického těsta, teploty sušení, velikosti vzorku a obsahu ostřiva na tvar Bigotovy křivky a na hodnotu citlivosti k sušení.

Rozsah práce 40 - 50 stran.

.....
doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na použití Bigotovy křivky jako nástroje pro posuzování vlastností plastických keramických surovin.

V teoretické části je formou rešerše dostupné odborné literatury zpracován obecný náhled na problematiku Bigotovy křivky a aplikace vlastností z ní vycházejících pro některé konkrétní zeminy.

V praktické části byly určovány vlastnosti plastické keramické suroviny z lokality Jirčany, ze které byly z plastického těsta vytvářeny vzorky s různým obsahem vlhkosti, s přídavkem ostřiva a přísad. Na vzorcích byl sledován tvar Bigotovy křivky, hodnota kritické vlhkosti, velikost smrštění sušením a citlivost zeminy k sušení.

Klíčová slova

Bigotova křivka, plastické těsto, smrštění sušením, citlivost k sušení, vlhkost, kritická vlhkost, ostřivo, přísada, deformační poměr.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the use of the Bigot curve as a tool for assessing the performance of plastic ceramic materials.

The theoretical thesis is a form of research of available literature. It elaborates a general view on the Bigot curve and possible application properties which derive from it for some specific soil.

In the experimental part were determined properties of plastic ceramic material from location Jirčany from which were formed samples made of plastic dough with different moisture content, with the addition of grog and additives.

Properties such as shape of Bigot curve, critical moisture value, size of drying shrinkage and drying sensitivity of the soil were monitored on the samples.

Keywords

Bigot curve, plastic dough, drying shrinkage, drying sensitivity, moisture, critical moisture content, grog, additive, ratio of deformation.

Bibliografická citace VŠKP

SUK, Vojtěch. *Bigotova křivka jako nástroj pro posuzování vlastností plastického těsta*. Brno, 2014. 56 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29.5.2014

.....
podpis autora
Vojtěch Suk

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Radomíru Sokolářovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod	10
2	Cíl	11
3	Teoretická část	12
3.1	Suroviny pro výrobu keramických prvků z plastického těsta	12
3.1.1	Plastické suroviny	12
3.1.2	Neplastické suroviny	15
3.2	Sušení	16
3.2.1	Dynamika sušení	17
3.2.2	Statika sušení	17
3.2.3	Technologie sušení	18
3.3	Citlivost k sušení	20
3.3.1	Metody měření citlivosti k sušení	21
3.4	Bigotova křivka	21
3.4.1	Stanovení kritické vlhkosti W_k	22
3.4.2	Stanovení smrštění sušením	23
3.4.3	Stanovení koeficientu citlivosti k sušení podle Bigota	24
3.5	Historie Bigotovy křivky	25
3.6	Vliv složení keramického těsta na tvar Bigotovy křivky	26
3.6.1	Hodnocení sušení pomocí Bigotovy křivky (C. M. F. Vieira)	27
3.6.2	Stanovení citlivosti k sušení pomocí Bigotovy křivky (Thajsko)	31
3.6.3	Bigotovy křivky vybraných zemin z ČR	34

4	Experimentální část	36
4.1	Vstupní suroviny	36
4.1.1	Použité metody analýzy suroviny	36
4.1.2	Cihářská zemina.....	36
4.1.3	Ostřivo	38
4.1.4	Přísady	39
4.2	Příprava zkušebních vzorků.....	41
4.3	Zkoušky plastického těsta	41
4.3.1	Plastičnost těsta podle Pfefferkorna.....	41
4.3.2	Skutečná vlhkost těsta w_r	43
4.4	Sušení vzorků	43
4.5	Vytváření zkušebních těles z plastického těsta	44
4.6	Vyrobené směsi	45
4.7	Vyhodnocení výsledků	46
5	Závěr	51
	Seznam použité literatury.....	53
	Seznam použitých tabulek a obrázků	55

1 Úvod

Při vytváření keramických výrobků z plastického těsta dochází v průběhu sušení k odstraňování vlhkosti. Během sušení se nemění chemické vlastnosti sušené hmoty, mění se pouze vlastnosti fyzikální, mechanické a technologické. Proces sušení popisuje Bigotova křivka, která primárně znázorňuje závislost smrštění na snižování vlhkosti. S její pomocí se dají stanovovat i další ukazatele potřebné při výrobě keramiky, například citlivost k sušení, smrštění tělesa sušením nebo určení kritické vlhkosti w_k . Odstranění vlhkosti z výlisků je důležitým krokem v procesu vytváření keramických výrobků. Bez procesu sušení by při výpalu unikající vlhkost výrobky poškodila.

2 Cíl

Cílem bakalářské práce je posouzení problematiky týkající se používání Bigotovy křivky v keramické technologii zejména u plastických surovin.

V rámci teoretické části práce budou popsány výsledky získané rešerší dostupné odborné literatury z hlediska historie, spektra využití Bigotovy křivky, která je primárně chápána jako charakteristický ukazatel závislosti mezi smrštěním a vlhkostí, jako nástroje pro určování různých vlastností plastických keramických surovin. Dílčím cílem bude také uvedení konkrétních křivek pro různé druhy jílovitých zemin s přihlédnutím k mineralogickému složení.

V rámci experimentální části práce se budou především posuzovat vlivy vlhkosti plastického těsta, množství ostřiva a speciálních přísad na tvar Bigotovy křivky, velikost smrštění sušením a na hodnotu citlivosti k sušení.

K dosažení stanovených cílů této bakalářské práce bude použita metoda komparace, analýza a syntéza ze získaných poznatků.

3 Teoretická část

3.1 Suroviny pro výrobu keramických prvků z plastického těsta

Z hlediska chování s vodou lze suroviny pro výrobu stavební keramiky rozdělit na:

- **plastické**
- **neplastické**

3.1.1 Plastické suroviny

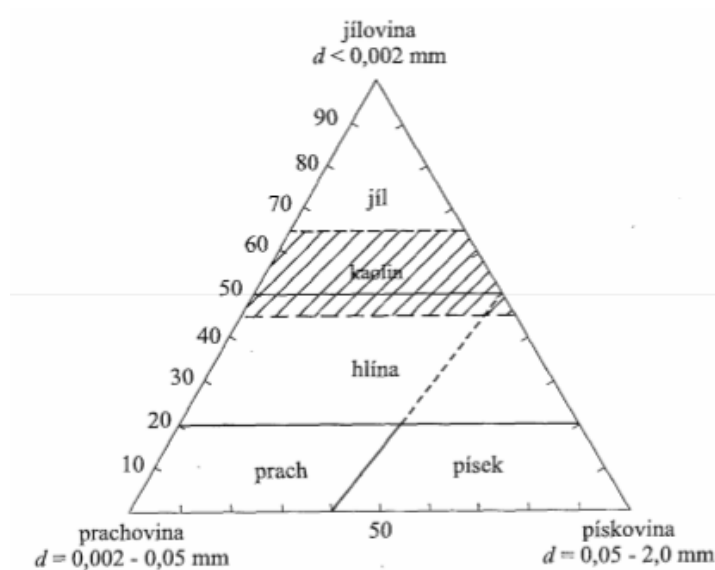
Vytváření keramických výrobků z plastického těsta předchází procesu sušení. Plastické keramické suroviny mají schopnost po rozdělání s vodou (cca 20 % hmotnostních) vytvářet těsto, které lze snadno tvarovat. Tvarováním těsta se neporušuje jeho celistvost. Jílovinové zeminy, jak se také někdy označují plastické keramické suroviny, obsahují jílové minerály, které zaručují tuto tvárnost (plasticitu), obsahují i určitý podíl neplastických součástí. [1]

Velikost zrn

Jílovinové zeminy se rozdělují také podle velikosti zrna, hovoříme o obsahu jílovin (zrna o průměru < 2 mm), prachoviny (zrna o průměru 2 - 50 mm) a pískoviny (zrna o průměru > 50 mm). V keramice používané jílovinové zeminy lze z hlediska granulometrie rozdělit na:

- jíly - s obsahem více než 50 % jílovin
- hlíny - obsahují 20 - 50 % jílovin a 50 - 80 % prachoviny s pískovinou
- kaoliny - lze zařadit mezi hranice jílu a hlíny

Obecně lze konstatovat, že čím více jílovin zemina obsahuje, tím více roste její plastičnost. Obsah jílovin v dalších součástech jílovinových zemin jako jsou prachy a písky dosahuje rozmezí 0 - 20 %, což je z hlediska plastického charakteru velmi málo, proto je řadíme spíše do neplastických surovin.



Obr. č. 1: Rozdělení jílovinových zemin dle granulometrie

Zdroj: [1]

Chemické složení

Při chemické analýze se u jílovinových zemin určuje obvykle obsah SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O a Na_2O . Z výsledných hodnot se dají částečně předpokládat jejich technologické vlastnosti, zejména jejich chování v žáru při výpalu.

SiO_2 - obsažen jako křemen nebo součást křemičitanů, při obsahu vyšším než 60 % lze očekávat menší citlivost k sušení, menší smrštění, nižší mechanickou pevností.

Al_2O_3 - obsažen v jílových minerálech, slídách a živcích, při vyšším obsahu ovlivňuje citlivost k sušení a smrštění.

CaO , MgO , K_2O , Na_2O - působí jako tavící oxidy (snižují teplotu slnutí směsi), některé zabarvují střep.

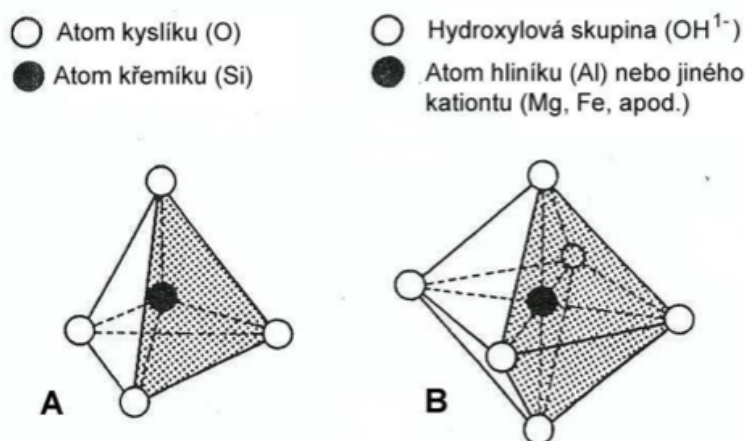
Mineralogické složení

Z hlediska mineralogického složení jsou jílovinové zeminy směsí jílových a nejílových minerálů.

Jílové minerály

Jsou tvořeny vodnatými hlinitokřemičitany (aluminosilikáty), které mají ve své struktuře atomy hořčíku, železa nebo alkálií. Základem vrstevnaté nebo řetězové struktury (kromě amorfního allofanu) je Si-O tetraedr, ale i Al-O-OH oktaedr. Dělíme je do čtyř skupin dle nejdůležitějších zástupců:

[1]



Obr. č. 2: Atomové uspořádání Si-O tetraedru (A) a Al-O-OH oktaedru (B)

Zdroj: [1]

- **skupina kaolinitu** - nejznámějšími zástupci jsou kaolinit a halloysit, dvouvrstvá struktura je tvořena Si-O tetraedry a Al-O-OH oktaedry
- **skupina montmorillonitu** - tvořená montmorillonitem, nontronitem, saponitem a jinými; montmorillonit je trojvrstvý jílový minerál, mezi základními trojvrstvy je nedostatek kladných nábojů, proto se na povrchu adsorbují kationty (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), při zvýšené vlhkosti dochází k bobtnání, zeminy s převažujícím obsahem montmorillonitu jsou známy pod názvem bentonity
- **skupina illitu** - označována jako hydroslídy, illit má podobnou strukturu jako montmorillonit, křemíkové ionty v tetraedrech jsou ve větší míře nahrazeny ionty hliníku, má lepší plastičnost než kaolinit
- **skupina chloritu** - minerály často obsažené v cihlářských zeminách, příklad chemického složení $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_2 [(\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10}]$ [2]

Rozdílné vlastnosti jílových minerálů mají vliv na rozdílné chování jílovinových zemin s různým obsahem druhů jílových minerálů. Jedná se hlavně o plastičnost zemin, tu ovlivňuje nejen množství jílových minerálů ale i velikost jílových zrn. [1]

Nejílové podíly jílovinových zemin

Tyto podíly jsou v jílovinových zeminách tvořeny hlavně většími zrny, velikostně odpovídajícím prachovině nebo pískovině. Patří sem například křemen, živce, slídy, vápenec, dolomit, organické látky, hydroxidy železa. Ovlivňují některé vlastnosti zeminy, například v průběhu výpalu mohou způsobovat nežádoucí objemové změny, naopak při sušení snižují citlivost k sušení, smrštění sušením; někdy tvoří charakteristické zabarvení zemin. [1]

3.1.2 Neplastické suroviny

Jsou to suroviny, které po rozdělení s vodou vytvoří plastické těsto. Jejich přidáním do plastické směsi ovlivňujeme některé vlastnosti směsi. Dle funkce v keramickém střepu je můžeme rozdělit na:

- ostřiva
- taviva
- lehčiva

Některé přísady mohou svoji funkci plnit současně, například při vytváření fungují jako ostřivo a během výpalu jako tavivo (živce).

Ostřiva

Přírodní nebo umělá ostřiva upravují vlastnosti plastického těsta - snižují plastičnost (snižují smrštění sušením, citlivost k sušení) a při výpalu mohou díky reakci s oxidy přítomnými v základních složkách suroviny tvořit pevný a hutný střep. Dle chemického hlediska je lze rozdělit na křemičitá, hlinitokřemičitá nebo speciální ostřiva.

Křemičitá ostřiva jsou na bázi SiO_2 , jako zdroj používáme krystalický křemen, křemenec (kvarcit), křemenný písek nebo křemelinu.

Hlinitokřemičitá ostřiva tvoří především šamotem, což jsou obecně vypálené lupky a jíly vypálené na teplotu 1000 - 1400 °C.

Speciální ostřiva jsou převážně syntetická pro speciální použití. Pro například žárovzdorné výrobky se používá korund, magnezitový slínek, dolomitický slínek a jiné. [1]

V experimentální části této bakalářské práce byl jako ostřivo využit fylit.

Taviva

Taviva snižují teplotu výpalu, přidávají se, abychom získali keramický střep o stejné pórovitosti při nižší teplotě výpalu než bez jejich použití. Účastní se tvorby taveniny při výpalu, můžou se podílet na vzniku nových krystalických fází. Lze je rozdělit na taviva základní a eutektická.

Základní taviva jsou obecně suroviny s nízkou teplotou tavení. Používají se živce - sodné, draselné, sodnodraselné, vápenaté. Pro tavící účinek je důležitý obsah alkalických oxidů. Z důvodu omezeného výskytu čistých živců se používají i suroviny s nižším obsahem alkálií - živcové pegmatity, pegmatity, odpady při plavení kaolinu nebo např. žula a odprašky vznikající při jejím drcení.

Eutektická taviva jsou suroviny s obsahem oxidů CaO, MgO, FeO, K₂O, Na₂O a jiné. Složky mezi sebou vzájemně reagují při nižší teplotě, než je teplota tání jednotlivých složek. Vznik taveniny a eutektickou teplotu v soustavě různých oxidů lze určit z fázových diagramů.

Pomocné suroviny

Jsou to příměsi a přísady, které se přidávají do výrobní hmoty s cílem ovlivnit některé její vlastnosti. Po výpalu nemají zásadní vliv na vlastnosti výrobku. Jsou to ztekucovadla, mýdla, sádra a jiné. V této bakalářské práci byl sledován vliv přísad BioKeram a VUPPOR.

3.2 Sušení

Keramické výrobky z plastického těsta obsahují rozdělovací vodu (zhruba 20 % hmotnostních), kterou je třeba před výpalem z výlisku nezávadně odstranit. Tento technologický proces nazýváme sušení a jedná se o odstraňování a snižování vlhkosti výlisku působením tepla na takovou hodnotu, která je předepsána podmínkami výpalu. [2]

Odstraňování vlhkosti z výlisku probíhá na principu přiváděného tepla, kterým se voda v mění v páru, která je díky nucenému oběhu odváděna vlhkým vzduchem. Výlisek se mění na výsušek s velmi malou vlhkostí. Ztrácí plastičnost a nabývá na určité pevnosti, dochází ke smršťování. Během sušení se částice přibližují v důsledku odstraňování vody. Vodní filmy, kterými jsou částice obaleny se zužují a dochází ke stahování částic k sobě a vytváří se kapilární pórovitost. [1]

Pravidla sušicího procesu lze rozdělit na části:

- dynamika sušení
- statika sušení
- technologie sušení

3.2.1 Dynamika sušení

Vysvětluje a popisuje jevy probíhající ve vysoušeném výlisku, stanovuje závislost změny vlhkosti výlisku na době sušení s ohledem na parametry sušicího média a popisuje fyzikální vlastnosti struktury vysoušené látky (např. smrštění). Cílem je definovat rychlost sušení, která je podmíněna schopností výlisků se zbavovat vlhkosti bez vzniku trhlin a deformací v závislosti na množství dodávaného tepla. Kapilární síly působící na povrchu jílových i jiných částic výlisek zpevňují. Odchodem vlhkosti se vytvářejí póry, částice mají sníženou volnost pohybu, ve výlisku vzniká napětí důsledkem gradientu smršťování. Tvorba pórů a smršťování jsou na sobě závislé. Nejdříve probíhá sušení na povrchu výlisku, jeho neúměrnému smrštění brání více vlhký střed výlisku, ve stádiu dosoušení naopak více vysušený povrch výlisku omezuje smrštění středu.

3.2.2 Statika sušení

Sleduje proces sušení z hlediska tepelné a látkové bilance vysoušené látky a fyzikálních parametrů sušicího média. Lze ji rozdělit do úseků:

- zobrazení stavů vlhkého vzduchu a izobarické změny stavu v $i - x$ diagramu vlhkého vzduchu
- modely teoretické sušárny umožňující bilancování vstupního a výstupního vzduchu, množství odpařené vody

- energetická náročnost sušení je vyjádřena měrnou spotřebou tepla (množství tepla v kJ, které je potřeba k odstranění 1 kg vody z výlisků, včetně tepelných ztrát sušárny)

3.2.3 Technologie sušení

Popisuje výrobní zařízení pro sušení, aplikuje poznatky dynamiky a statiky sušení aby sušící proces probíhal adekvátně a při minimální spotřebě tepla byly výlisky vysušeny kvalitně a bez deformací. Posuzuje konkrétní sušárny pracující periodicky nebo kontinuálně. [1]

Vznik trhlin a deformací

V průběhu sušení dochází ke smršťování výlisku a hrozí tak riziko vzniku trhlin a deformací. Průběh sušení lze popsat třemi periodami:

I. perioda - kapilární voda se pohybuje k povrchu vzorku, vytvořená pára difunduje dle rozdílných parciálních tlaků vodních par do sušícího média

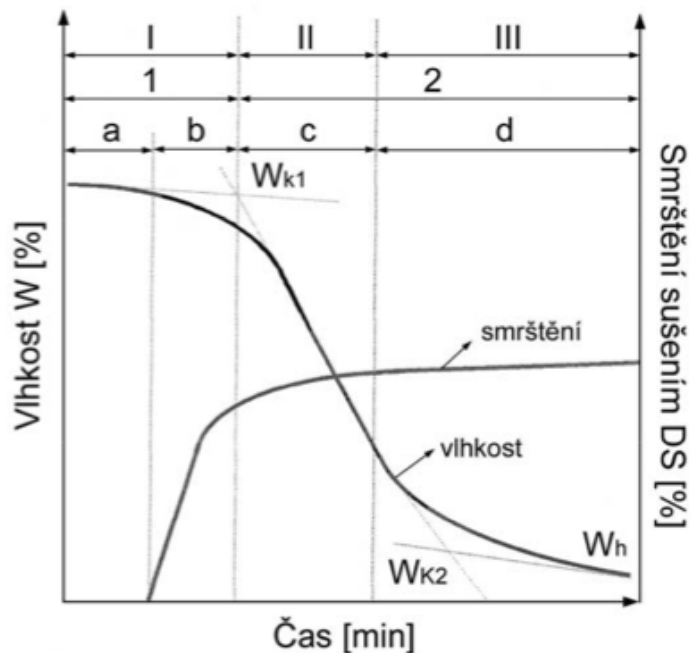
II. perioda - hladina odpařované vody z kapilár se posouvá do středu výlisku, vodní pára difunduje k povrchu v závislosti na tloušťce vysušovaného tělesa, vzniká 1. kritický bod (W_{k1})

III. perioda - vnitřní hladina vody uvnitř výlisku mizí, ustanovuje se 2. kritický bod (W_{k2}), rychlost sušení se asymptoticky přibližuje nulové hodnotě až dosáhne rovnovážné vlhkosti

Současně probíhá proces smršťování výlisku. Můžeme jej rozdělit na dvě fáze, každou fází ještě na dvě části.

1. fáze - má přibližně stejný průběh jako nebezpečná oblast v Bigotově křivce (4.4), rozdělujeme ji na **část a** - smrštění ještě nazačalo a výlisek se teprve ohřívá a **část b** - smršťování probíhá konstantní rychlostí (ideální smršťování).

2. fáze - skládá se z **části c** - rychlost smršťování se snižuje a blíží se k nule a **část d** - smrštění se ukončuje [1]



Obr. č. 3: Úseky sušení I-III, a smršťování - fáze 1,2 a části (a, b, c, d); W_{k1} - 1. kritický bod, W_{k2} - 2. kritický bod, W_h - hygroskopická vlhkost (vlhkost výsušku při rovnovážném stavu s okolní atmosférou o relativní vlhkosti 100 %)

Zdroj: [1]

Obr. 3 zobrazuje tyto fáze a části smršťování jako idealizované křivky, z kterých je patrná vzájemná souvislost ve vztahu k době sušení. Křivky reálných zemin nelze tak jednoznačně definovat, neboť konkrétní keramických materiály mají různou distribuci a velikost pórů. Optimální průběh smrštění popisuje pouze smrštění odpovídající ztrátě vlhkosti výlisku při sušení, reálné smrštění není určeno jen úbytkem vlhkosti, ale souvisí i se sorpcí vlhkosti, s difúzní schopností, s migrací vlhkosti a tepelnou a látkovou výměnou. [1]

Sorpce vlhkosti závisí na tlaku vodní páry ve vzduchu a na teplotě, průběh sorbčních křivek je závislý na průměru kapilár těsta. Čím plastičtější těsto, tím je sorbce větší.

Difuze se označuje zdánlivým difúzním odporem μ udávajícím kolikrát je menší difuze ve výlisku, než ve stejné tloušťce vrstvy vzduchu při stejné teplotě a tlaku, nabývá hodnot od 1 do 20 dle mineralogického složení těsta.

Migrace vlhkosti probíhá ve vysušovaném tělese v důsledku kapilárního podtlaku. Voda je odsávána z větších kapilár menšími. Obsah vlhkosti je různý na povrchu a ve středu vylisku. Je odlišná pro různé suroviny a umožňuje stanovit citlivost k sušení.[1]

Tepelná a látková výměna je důležitá při popisu sušení konvekci (prouděním). Výměna probíhá přes vrstvu vlhkého vzduchu na povrchu vylisku, odtud vodní pára dosahuje koncentrace nasycení. [2]

3.3 Citlivost k sušení

Proces sušení by se dal u keramického vylisku při jeho smršťování popsat jako přechod plastického těsta do stavu tuhého. Na jeho povrchu vznikají tahová napětí a v jeho středu tlaková. Když napětí přesáhne mez pevnosti při určité vlhkosti těsta, vznikají nežádoucí trhlinky. Dokud je vylisek v plastickém stavu, deformace a smrštění jsou v rovnováze. Po přechodu do pevného stavu vyvolají nadměrná tahová napětí trhlinky. Optimálních paramterů sušení dosáhneme, nalezneme-li takovou maximální rychlost, při které nevzniknou trhlinky. [2]

Rozdílná citlivost k sušení cihlářské suroviny je závislá na vaznosti hlíny a na primárních (fyzikálně-chemických) a sekundárních (fyzikálně technologických) příčinách.

Primární příčiny citlivosti k sušení spočívají ve vlastnostech závislých na vnitřním povrchu jílových minerálů. Vliv povrchové aktivity částic ovlivňuje: velikost částic a jejich struktura, výměna iontů a chemické složení jílovitých částic, koncentrace vodíkových iontů, ζ - potenciál a obsah tenzidů. Při zvýšeném obsahu částic $< 2 \mu\text{m}$ se zvyšuje náchylnost k tvorbě textury při vytváření, dochází k omezení kapilarity střepu a tím snižování difúze vlhkosti. Nejvíce citlivé jsou minerály typu montmorillonit, středně citlivé typy illitu a nejméně kaolitnit.

Sekundární příčiny citlivosti k sušení jsou popisovány především rychlostí sušení $g [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}]$, která je stejným rozměrem jako měrný tok vlhkosti $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}]$, která se odpaří z m^2 za hodinu. Jako kritický se považuje největší tok, při kterém vznikají trhlinky.

Citlivost k sušení lze ovlivňovat anorganickými přísadami např. CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaO v množství k suché surovině 0,02 - 2 % hmotnostních nebo organickými

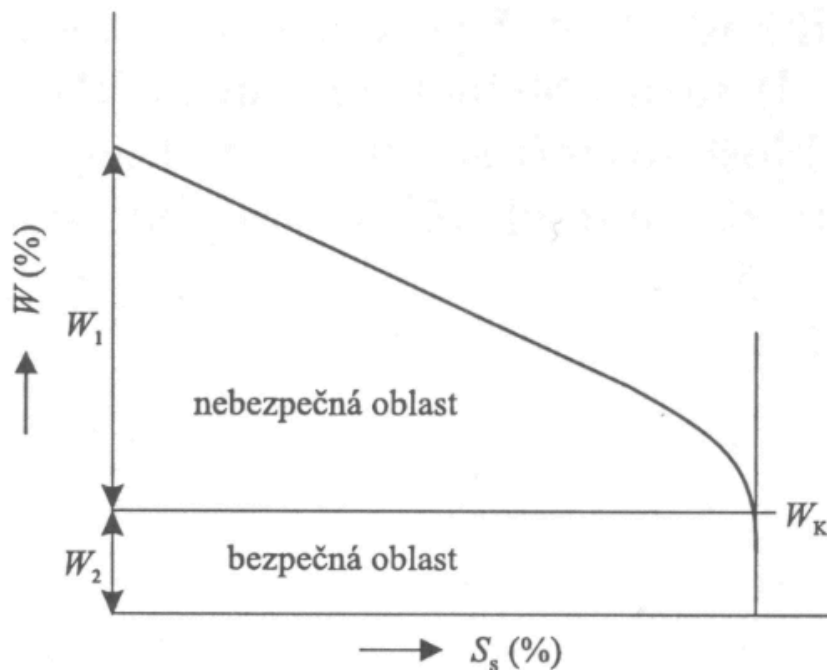
rozpustnými látkami (tenzidy) v množství k suché surovině 0,02 - 1 % hmotnostních. Citlivost lze snížit také optimální koncentrací iontů: nejvíce 0,51 % Na^+ , méně 0,13 % Ca^{2+} a nejméně 0,03 % Fe^{3+} . [2]

3.3.1 Metody měření citlivosti k sušení

Metody měření lze rozdělit na přímé (sleduje se vlhkost nebo doba vzniku první trhlinky) a nepřímé (posuzují např. smrštění, gradienty vlhkosti, pevnost výsušku v tahu za ohybu). Tato práce se zabývá také jednou z nejčastěji používaných nepřímých metod, metodou měření citlivosti k sušení podle Bigota (4.4), byl použit i přepočet dle zdroje [7].

3.4 Bigotova křivka

Bigotova křivka zobrazuje a umožňuje určit závislost lineárního smrštění na vlhkosti tělesa (výlisku) z plastického těsta v průběhu jeho sušení. Je tvořena vodorovnou osou, která znázorňuje velikost lineárního smrštění sušením S_s v %, ke kterému dochází vlivem odstraňování vody z vysušovaného výlisku. Na svislé ose je vyznačeno množství celkové vlhkosti W v %, kterou obsahuje výlisek. Tuto celkovou vlhkost lze rozdělit na dvě oblasti: nebezpečnou oblast W_1 , při které probíhá smršťování až do kritického bodu W_k a bezpečnou oblast W_2 , v které smršťování již neprobíhá.



Obr. č. 4: Bigotova křivka, závislost smrštění sušením S_s na vlhkosti W

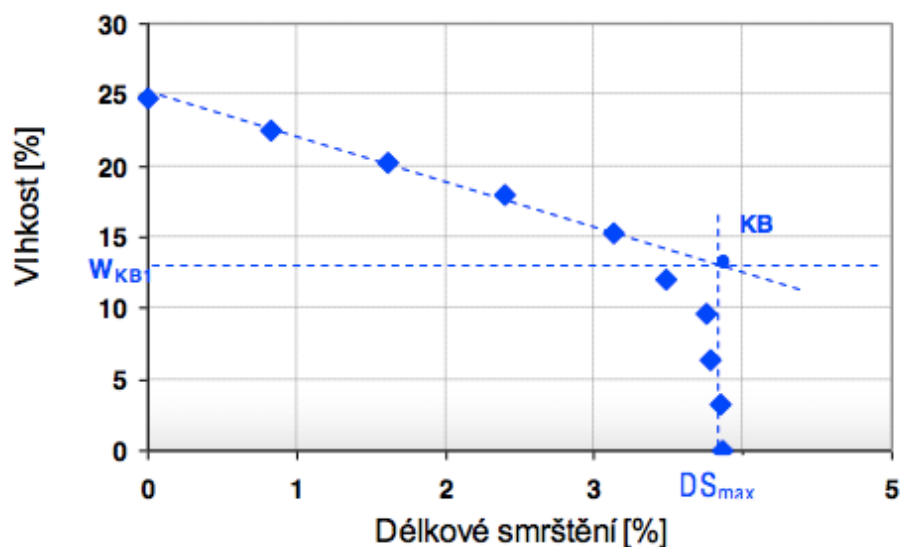
Zdroj: [5]

Pomocí Bigotovy křivky lze stanovit:

- kritická vlhkost W_k
- smrštění tělesa sušením S_s
- koeficient citlivosti k sušení k_c

3.4.1 Stanovení kritické vlhkosti W_k

Kritická vlhkost se stanovuje z grafu Bigotovy křivky, proložením dvou přímkou body grafu. Průsečík dvou přímkou určí kritický bod vlhkosti W_k , jehož hodnota se odečte na svislé ose a stanoví kritickou vlhkost, která odděluje nebezpečnou a bezpečnou oblast sušení (obr. č. 5).



Obr. č. 5: Stanovení kritické vlhkosti W_k

Zdroj : [3]

3.4.2 Stanovení smrštění sušením

Keramické výrobky z plastického těsta obsahují větší množství vody. Vlivem odpařování vody z výlisku se k sobě částice plastického těsta přibližují a dochází ke smršťování sušením. Hodnota smrštění se vyjadřuje v % změny rozměrů tělesa v průběhu sušení. Pro stanovení hodnoty smrštění je třeba změřit rozměr (nejčastěji délkový) bezprostředně po vytvarování tělesa a stejný rozměr změřit i po vysušení tělesa do konstantní hmotnosti. Základním rozměrem může být změřená délka vytvářecí formy nebo lze na vytvořeném tělese vyznačit určitou úsečku a změřit její délku při vytvoření tělesa a po vysušení tělesa. Hodnotu smrštění sušením S_s pak lze vypočítat podle vztahu:

$$S_s = \frac{l_v - l_s}{l_s} \cdot 100 \quad [\%], \text{ kde}$$

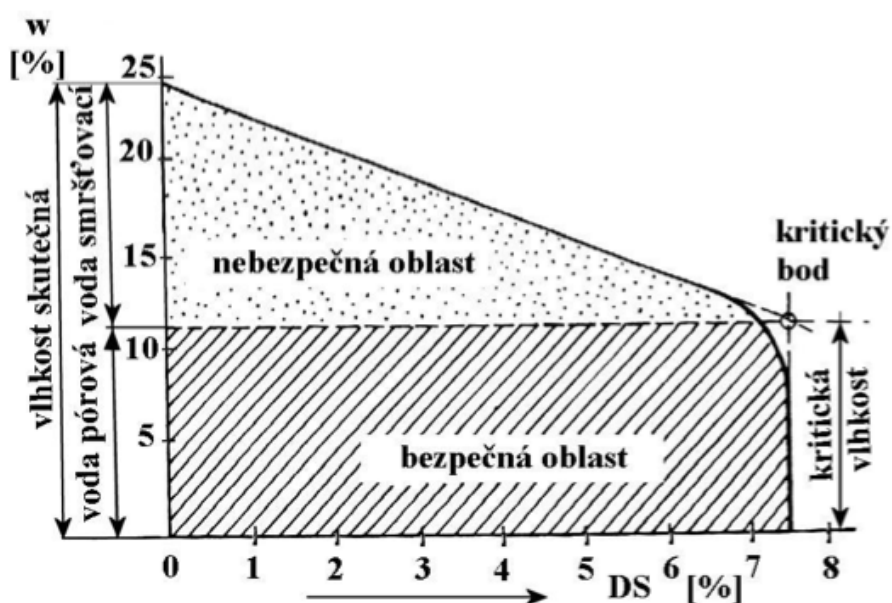
l_v rozměr tělesa po vytvarování [mm]

l_s rozměr tělesa po vysušení [mm]

[5]

3.4.3 Stanovení koeficientu citlivosti k sušení podle Bigota

Bigotova křivka umožňuje zjistit vlastnosti keramického výlisku použitím techniky, umožňující záznam o úbytku váhy jako funkci lineárního smrštění. Křivku je potřeba srovnávat s výliskem tvořeným jen samotným jílovým materiálem a s výliskem tvořeným jílem a počáteční příměsí, neboť smrštění závisí hlavně na obsahu jílu. Velikost smrštění závisí také na velikosti částic surovin tvořící plastickou hmotu a na jejich složení. [4]



Obr. č. 6: Bigotova křivka

Zdroj: [3]

V průběhu sušení výlisku z plastického těsta dochází vlivem odpařování vody ke smršťování. Proces smršťování je však ukončen dříve, než dojde k odpaření veškeré vody. Tu lze ve výlisku rozdělit na:

- vodu smršťovací (koloidní) - voda unikající od počátku smrštění do doby, kdy smršťování ustává.
- vodu pórovou - nezpůsobuje smršťování, uniká až do úplného vysušení výlisku, je obsažena v pórech mezi zrny zeminy, které se k sobě přiblížily natolik, že se vzájemně dotýkají.[3]

Chování plastického těsta při sušení lze charakterizovat pomocí koeficientu citlivosti k sušení CSB . Koeficient se stanovuje z poměru obsahu vlhkosti tzv. nebezpečné oblasti sušení W_1 (obsah smršťovací vody) a obsahu kritické vlhkosti z tzv. bezpečné oblasti W_2 (obsah pórové vody). Označíme-li celkovou vlhkost plastického těsta (skutečnou) jako W , lze pak koeficient vypočítat ze vzorce:

$$CSB = \frac{W - W_2}{W_2} \quad [-]$$

[5]

Podle velikosti výsledného koeficientu citlivosti k sušení CSB můžeme zkoušenou keramickou směs zařadit do čtyř skupin:

$CSB < 1$	směs je málo citlivá k sušení
$CSB = 1 - 1,5$	směs je středně citlivá k sušení
$CSB = 1,5 - 2$	směs je citlivá k sušení
$CSB > 2$	směs je silně citlivá k sušení

[3]

3.5 Historie Bigotovy křivky

Bigotovu křivku popsal francouzský vědec a především výrobce keramiky Alexandre Bigot (5. 11. 1862 – 27. 4. 1927). Inspirován výstavou čínského porcelánu v roce 1889 v Paříži se začal hlouběji zabývat procesy výroby keramiky. Činnost jeho továrny produkující širokou škálu výrobků byla ukončena v roce 1914 poté, co se Bigot stal technickým poradcem v keramickém průmyslu.

Roku 1921 je datován jeho článek *Retrait au Séchage des Kaolins et Argiles* pojednávající o zákonitostech a vlivu vlhkosti keramiky na jeho smrštění, publikovaný ve zprávě Akademie věd v Paříži. Originální dokument, který by si zasloužil podrobnější zkoumání, bohužel není dostupný ani v knihovně VUT v Brně, ani v Moravské zemské knihovně a to v jakémkoliv jazykové mutaci či originále.

3.6 Vliv složení keramického těsta na tvar Bigotovy křivky

Smrštění, ke kterému dochází v průběhu sušení tělesa z plastického těsta je v Bigotově křivce závislé na obsahu vlhkosti. Velikost smrštění lze ovlivnit množstvím přidané vody nebo přidáním ostřiva (4.1.3). Obecně lze říci, že čím více vlhkosti těsto obsahuje, tím větší bude jeho smrštění sušením. Nejvíce se smršťují zeminy s vysokým obsahem jíloviny (částic menších než 2 mm). K dosažení plastičnosti u těchto zemín je zapotřebí i větší množství vody.

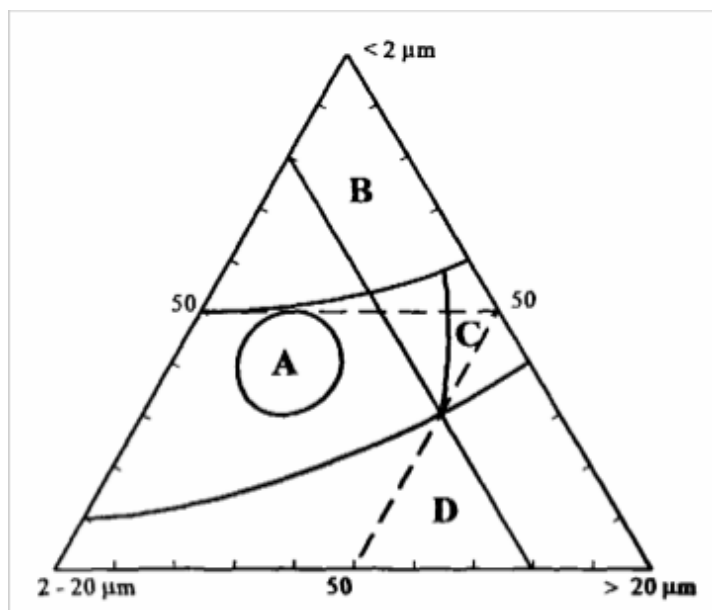
Přidáním ostřiva do těsta se sníží jeho plastičnost, citlivost k sušení a velikost smrštění, jak lze vyčíst z tabulky č. 1, kde je jako ostřivo použit křemičitý písek frakce 0,2 - 1 mm.

Tabulka č. 1: Vliv složení těsta na smrštění sušením

	jíl - 100 %	jíl - 80 % písek - 20 %	jíl - 70 % písek - 30 %
vytvářecí vlhkost [%]	35	26	24
smrštění sušením [%]	8	7,2	6,7

Zdroj: [4]

Zásadní roli hraje také mineralogické složení těsta. Vysoce plastické jíly jsou tvořeny velmi malými částicemi a budou mít větší smrštění, jak vyplývá i z obr. č. 7, který zobrazuje oblasti z hlediska kvality výlisku v závislosti na mikrogranulometrii zeminy.



Obr. č. 7: Upravený Winklerův diagram

Zdroj: [1]

Oblast A označuje zónu, kde je nejvhodnější skladba zrn, surovina je dobře zpracovatelná, střep kvalitní.

Oblast B je oblast s vysokým obsahem jíloviny, má vysoké smrštění sušením (8 %), velkou citlivost k sušení, je potřeba větší množství rozdělovací vody.

Oblasti C chybí střední frakce zrn, pevnost výrobků je malá.

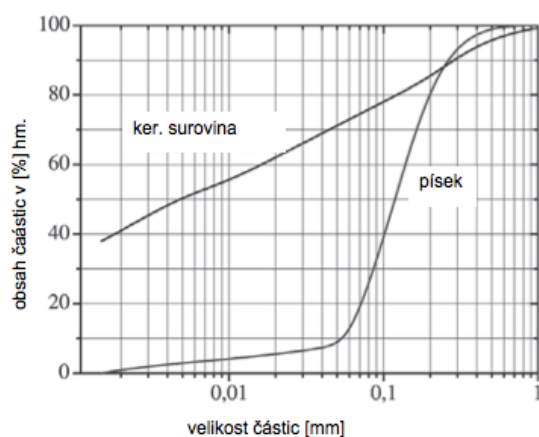
Oblast D má nedostatek jíloviny k vazbě zrn, těsto je málo soudržné. [1]

Předpoklad, že se nejvíce smrští plastické těsto tvořené výhradně jílovinou, potvrzuje článek brazilského časopisu *Cerâmica Industrial* [6], který se zabývá smrštěním sušením při výrobě červené keramiky a posuzuje složení těsta pomocí Bigotovy křivky.

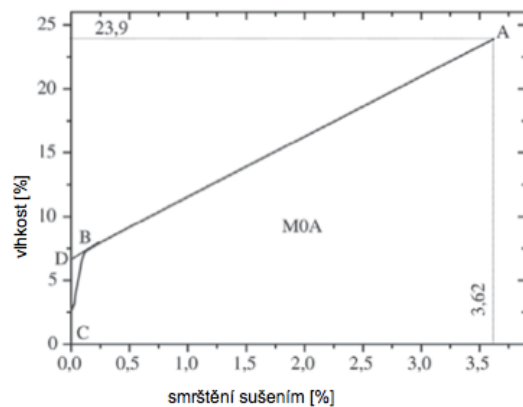
3.6.1 Hodnocení sušení pomocí Bigotovy křivky (C. M. F. Vieira)

Cílem této studie [6] bylo posoudit smrštění sušením surovinové směsi, do které autor přidával ostřivo v podobě křemičitého písku v množství 5, 10, 15 a 20 % hmotnostních. Byla také vytvořena záměs tvořená pouze směsí třech jílovitých surovin z okolí města Campos dos Goytacazes. Každá záměs byla nejdříve 30 minut v suchém stavu homogenizována, poté byla do záměsi přidána voda

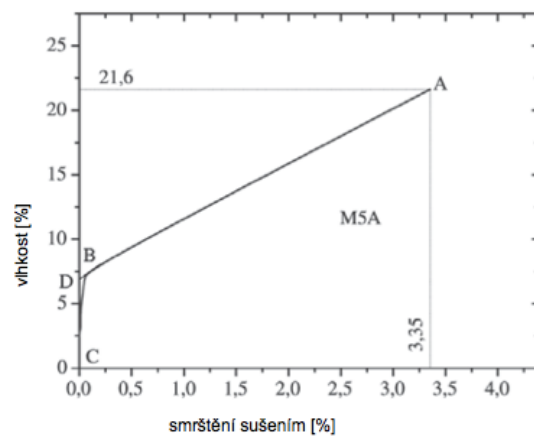
v takové míře, aby ze směsi bylo možné vytvořit plastickou hmotu, ze které se vytlačovala tělesa o rozměru 100 x 30 x 1,1 mm. Tato tělesa byla nejprve vysušena po dobu 72 hodin při teplotě místnosti, poté byla dosušena do ustálené hmotnosti v sušárně při teplotě 50 °C. Hmotnost a rozměry těles byly neustále monitorovány, ze získaných hodnot byla vytvořena Bigotova křivka.



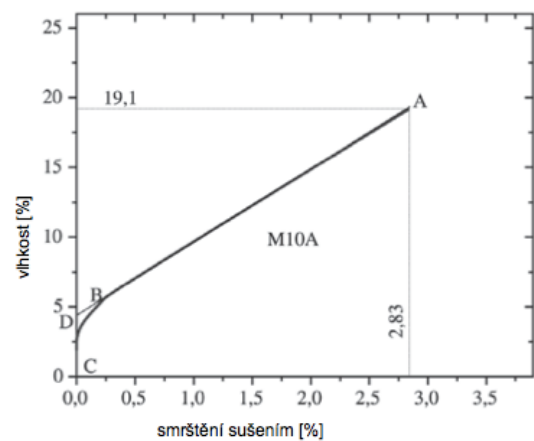
Obr. č. 8: Granulometrické zastupení základních surovin



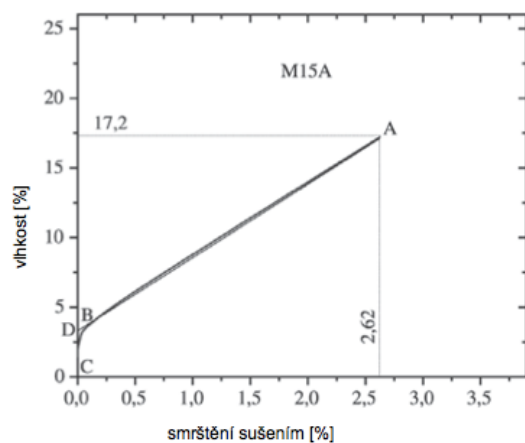
Obr. č. 9: Bigotova křivka, směs bez přidání písku (M0A)



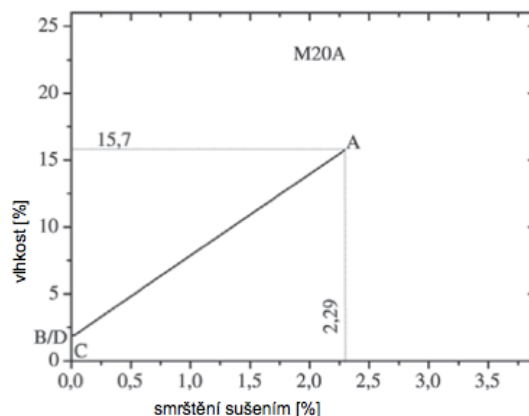
Obr. č. 10: Bigotova křivka, směs s přidáním 5 % písku (M5A)



Obr. č. 11: Bigotova křivka, směs s přidáním 10 % písku (M10A)



Obr. č. 12: Bigotova křivka, směs s přidáním 15 % písku (M15A)



Obr. č. 13: Bigotova křivka, směs s přidáním 20 % písku (M20A)

Na obrázku č. 8 je zobrazena velikost a rozdělení částic použitých surovin. Obsah jílovitých částic menších než 0,002 mm je 41 % hmotnostních. Písek je zastoupen v největší míře v rozmezí frakce 0,06 - 0,2 mm.

Obrázek č. 9 znázorňuje Bigotovou křivku pro záměs M0A, která neobsahuje žádný přidaný písek. Vlhkost vzorku z této záměsi dosáhla hodnoty 23,9 % hmotnostních a smrštění sušením hodnoty 3,62 %. Bod D označuje kritický bod mezi nebezpečnou a bezpečnou oblastí sušení. Plastická voda byla v tomto vzorku zastoupena 17,2 % hm. a smršťovací voda 6,7 % hmotnosti.

Křivky záměsí s přidavkem písku M5A, M10A, M15A a M20A na obrázcích č. 10 - 13 ověřují předpoklad, že s rostoucím přidavkem písku do keramického těsta se snižuje obsah vody potřebný k dosažení optimální plasticity a snižuje se smrštění sušením. Již při přidání 5 % písku došlo ke snížení vlhkosti těsta z 23,9 % na hodnotu 21,6 % hm. což odpovídá snížení o 9,6 % a snížilo se i smrštění z 3,62 % na 3,35 %, což odpovídá snížení o 6,9 % oproti záměsi tvořené pouze jílovitou surovinou.

Ze studie tedy vyplývá, že:

- vytvářecí vlhkost je silně závislá na množství jílovitého materiálu v plastickém těstě.
- přidavky písku přispěly ke snížení množství vytvářecí vody a následně i redukci smrštění sušením.

- u záměsí s rostoucím přídatkem písku došlo ke snížení obsahu pórové vody z důvodu lepšího obalení částic.

3.6.2 Stanovení citlivosti k sušení pomocí Bigotovy křivky (Thajsko)

Další studie [7], která používá Bigotovu křivku jako nástroj pro stanovení vlastností plastického těsta, je článek z časopisu Applied Clay Science. Autoři v ní popisují vzájemnou souvislost mezi Bigotovým a Ratzenbergerovým indexem sušení na červeném jílu z provincie Ratchaburi v Thajsku. Další zjišťovanou vlastností bylo smrštění sušením. Použité suroviny byly z místních zdrojů. Červený jíl (Red clay) z provincie Ratchaburi je velmi lepkavý a obtížně se vysušuje, proto k němu byly v různých poměrech přidávány příměsi (ostriva) v podobě šamotu (Grog), písku (Sand) a živce (Pottery stone) z důvodu snížení plasticity a zlepšení procesu sušení. Velikost částic příměsí byla kontrolována propadem sít, částice jsou menší než 0,42 mm. Bylo vytvořeno 11 záměsí (mixture), záměs č. 11 je tvořena pouze červeným jílem, záměsí č. 1 - 10 obsahují různé poměry šamotu, písku a živce. Složení jednotlivých záměsí v % hmotnosti je zaneseno v tabulce č. 2.

Tabulka č. 2: Složení záměsí v % hmotnosti

Mixture	Red clay	Grog	Sand	Pottery stone
1	80	8	12	–
2	80	8	3	9
3	80	8	6	6
4	80	8	9	3
5	70	8	11	11
6	70	8	16.5	5.5
7	70	8	5.5	16.5
8	60	8	24	8
9	60	8	8	24
10	60	8	16	16
11	100	–	–	–

Každá záměs byla vytvořena ručně, přiměřené množství vody bylo zjištěno pomocí Pfefferkornova přístroje, poté bylo těsto zabaleno do plastové folie a uloženo při teplotě místnosti po dobu 48 hodin. Po této době byl z těsta vytvořen vzorek o rozměrech 120x20x5 mm. Vzorek byl umístěn na skleněnou podložku s tenkou papírovou podložkou, která se smrští spolu se vzorkem v průběhu sušení, na horním povrchu vzorku byla otiskem vyznačena 100 mm značka a vzorek byl volně vysušován po dobu 48 hodin v místnosti bez přístupu vzduchu. V čase 0,1,2,3 až 48 hodin se zjišťovala hmotnost vzorku včetně skleněné podložky

a papíru a měřila se délka značky. Vzorek se pak vysušil při 110 °C do ustálené hmotnosti a byla změřena délka vysušeného vzorku pro zjištění smrštění sušením (DS). Naměřené hodnoty smrštění a obsahu vlhkosti se zanesly do grafu (obr. č. 14). Výpočet indexu citlivosti k sušení DSI-B byl proveden pomocí rovnice:

$$DSI - B = \frac{(M_i - M_c)}{100} \cdot DS, \text{ kde}$$

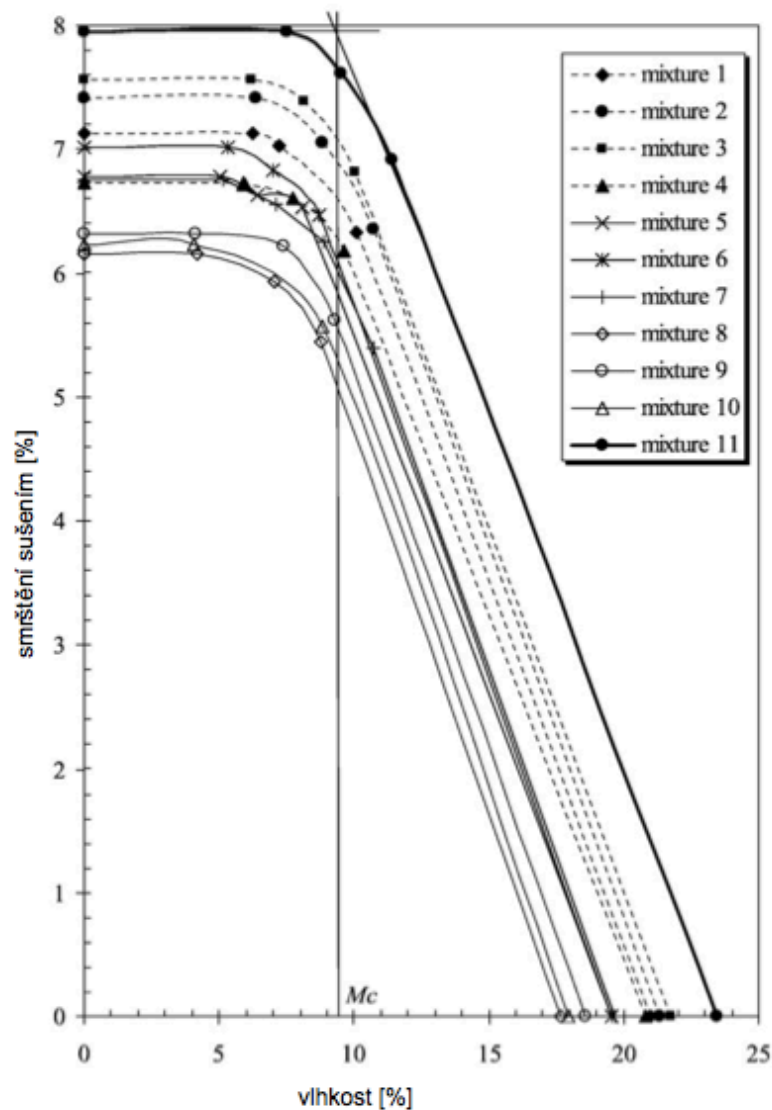
M_i počáteční vlhkost těsta [%]

M_c kritická vlhkost, při které ustává smrštění [%]

DS smrštění sušením [%]

Tabulka č. 3: Hodnoty M_i , M_c , DS , $DSI-B$

Mixture	M_i (%)	M_c (%)	$M_i - M_c$ (%)	DS (%)	$DSI-B$
1	21.0±0.17	9.00±0.36	12.0	7.13±0.33	0.85±0.04
2	21.3±0.16	9.37±0.29	11.9	7.42±0.28	0.89±0.03
3	21.7±0.23	9.27±0.12	12.4	7.57±0.53	0.94±0.08
4	20.8±0.05	8.90±0.10	11.9	6.73±0.21	0.80±0.03
5	19.5±0.24	8.80±0.17	10.7	6.78±0.44	0.73±0.06
6	19.6±0.06	8.73±0.15	10.9	7.02±0.03	0.76±0.01
7	19.7±0.09	8.67±0.35	11.0	6.75±0.33	0.74±0.03
8	17.7±0.16	8.07±0.40	9.6	6.15±0.53	0.59±0.04
9	18.6±0.22	8.53±0.06	10.1	6.32±0.06	0.63±0.02
10	17.9±0.16	8.20±0.00	9.7	6.23±0.08	0.61±0.00
11	23.5±0.20	9.40±0.26	14.1	8.03±0.25	1.13±0.02



Obr. č. 14: Závislost smrštění sušením na vlhkosti - všechny záměsi

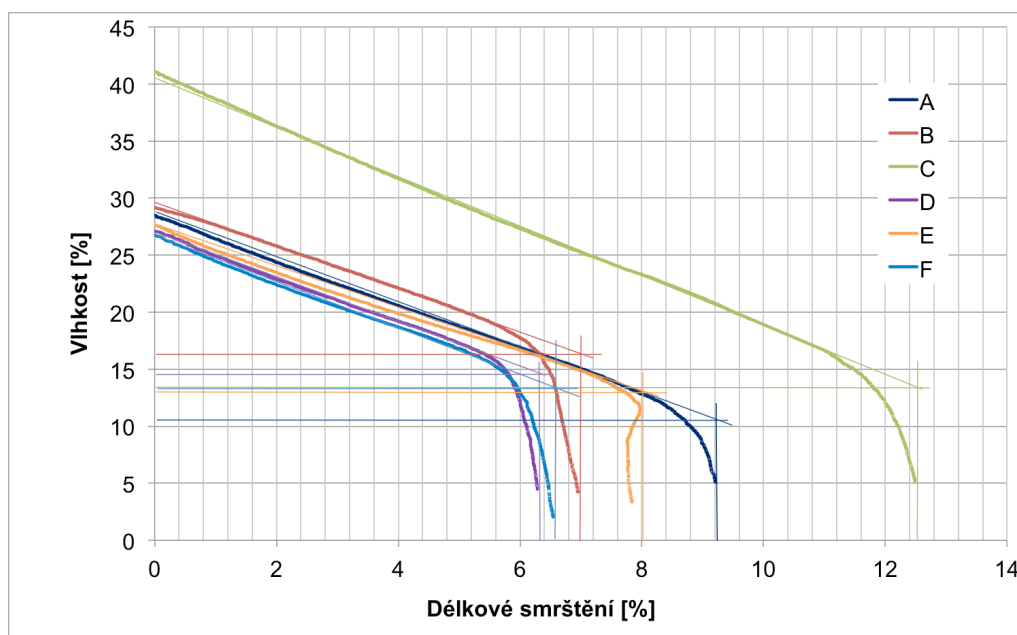
Obrázek č. 14 zobrazuje Bigotovy křivky každé vytvořené záměsi. Jak z něj lze vyčíst, největší smrštění sušením měl vzorek tvořen pouze čistým červeným jílem (mixture 11), hodnota smrštění činila 8,03 %. Nejméně se smršťil vzorek vytvořený ze záměsi č. 8, kde byl největší přídavek písku (24 %). Opět se tedy potvrzuje předpoklad, že plastická těsta s vyšším podílem jílovité suroviny budou více citlivá k sušení a jejich smrštění bude větší, než u těst s přídavkem ostřiva.

3.6.3 Bigotovy křivky vybraných zemin z ČR

Pro demonstraci tvaru Bigotovy křivky a některých vlastností sledovaných při sušení u těles z jiné zeminy než použité v této práci (zemina Jirčany), je uveden obrázek č. 15 a tabulka č. 4. Hodnoty jsou převzaty z bakalářské práce [12], která měla za cíl porovnání cihlářských zemin pro výrobu tepelně izolačních tvarovek typu THERM. Zkušební vzorky byly vytvořeny s deformačním poměrem okolo hodnoty 0,6 (plastická těsta z cihlářských zemin).

Zeminy posuzované v této práci jsou z lokalit:

- | | |
|----------------------------------------|--------------------------------|
| A. Týn nad Vltavou - nevápenatá zemina | D. Novosedly - vápenatá zemina |
| B. Novosedly - vápenatá zemina | E. Boleráz - vápenatá zemina |
| C. Jezernice - vápenatá zemina | F. Hevlín - vápenatá zemina |



Obrázek č. 15: Bigotovy křivky vybraných zemin A - F

Zdroj: [12]

Tabulka č. 4: Naměřené a vypočtené hodnoty zemin A -F

Vzorek	Def. poměr [-]	w_r [%]	CSB [-]	DS [%]
Zemina A	0,56	29,4	1,65	-8,44
Zemina B	0,63	27,5	0,79	-6,42
Zemina C	0,60	44,6	2,00	-10,94
Zemina D	0,57	27,8	0,84	-5,54
Zemina E	0,66	30,1	1,69	-10,76
Zemina F	0,53	35,6	1,45	-5,91

Zdroj: [12]

Mezi tvarem Bigotových křivek uvedených zemin není z pohledu mineralogického složení (vápenaté a nevápenaté) zásadnější rozdíl. Nevápenatá zemina A měla nepatrně větší smrštění než některé vápenaté zeminy (B, D, F), avšak vápenaté zeminy C a E dosáhly výraznější hodnoty smrštění, byly to zeminy s největším množstvím rozdělovací vody.

4 Experimentální část

4.1 Vstupní suroviny

4.1.1 Použité metody analýzy suroviny

- **Diferenční termická analýza (DTA)** se používá k identifikaci jednotlivých složek zkoumané látky a společně s termogravimetrickou analýzou (TG) i ke kvantitativnímu určení složek. Principem DTA analýzy je zjišťování rozdílu nárůstu teploty zkoumaného vzorku a inertního materiálu, výsledkem je graf s píky (výstupky). Pokud je směr křivky v grafu vodorovný, znamená to, že vzorek má stejný teplotní přírůstek jako inertní materiál a ve vzorku nedochází k žádným změnám. Pík směřující dolů indikuje, že zkoumaný vzorek má menší teplotní přírůstek než inertní materiál a tudíž v něm došlo k endotermní reakci (např. uvolnění chemicky vázané vody). Exotermní reakci, jakou může být vyhořívání organických látek a větší teplotní přírůstek indikuje pík směřující nahoru. Z křivky lze identifikovat látku a popřípadě i stanovit její reakční teplo a sledovat mechanismus a kinetiku reakcí. Termogravimetrická analýza zaznamenává úbytky hmotnosti v průběhu zahřívání vzorku a umožňuje tak při znalosti příslušných chemických rovnic určení kvantitativního zastoupení složek.
- **Rentgenová difrakční analýza** slouží ke stanovení mineralogického složení zkoumaného materiálu. Vychází z principu difrakce rentgenového záření dopadajícího na krystalickou látku. Každý krystal vykazuje soubor rovnoběžných mřížkových rovin proložených v různých směrech. Mezirovinnou vzdálenost označovanou jako d lze pomocí této metody zjistit a známe-li hodnoty souboru mezerovitých vzdáleností pro různé minerály, lze na základě těchto hodnot identifikovat minerál ve zkoumaném vzorku.
[13]

4.1.2 Cihlářská zemina

Pro výrobu a zkoušení vzorků byla použita cihlářská zemina z cihelny Dolní Jirčany. Zemina byla pomleta v kolovém mlýně. Granulometrie nebyla pro experimentální část stanovována.

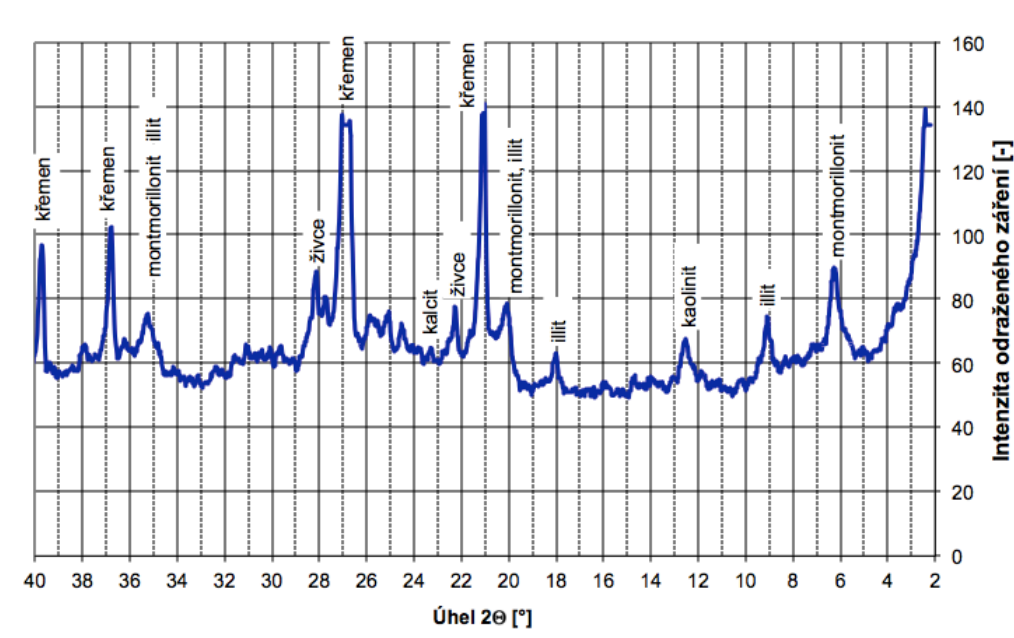
Chemické složení použité zeminy:

Tabulka č. 5: Chemické složení zeminy Jirčany - procentuální zastoupení prvků

oxid	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	CaO	MgO	ZŽ
Jirčany	69,2	12,3	5,4	0,1	1,1	2,1	0,6	1,2	1,1	6,8

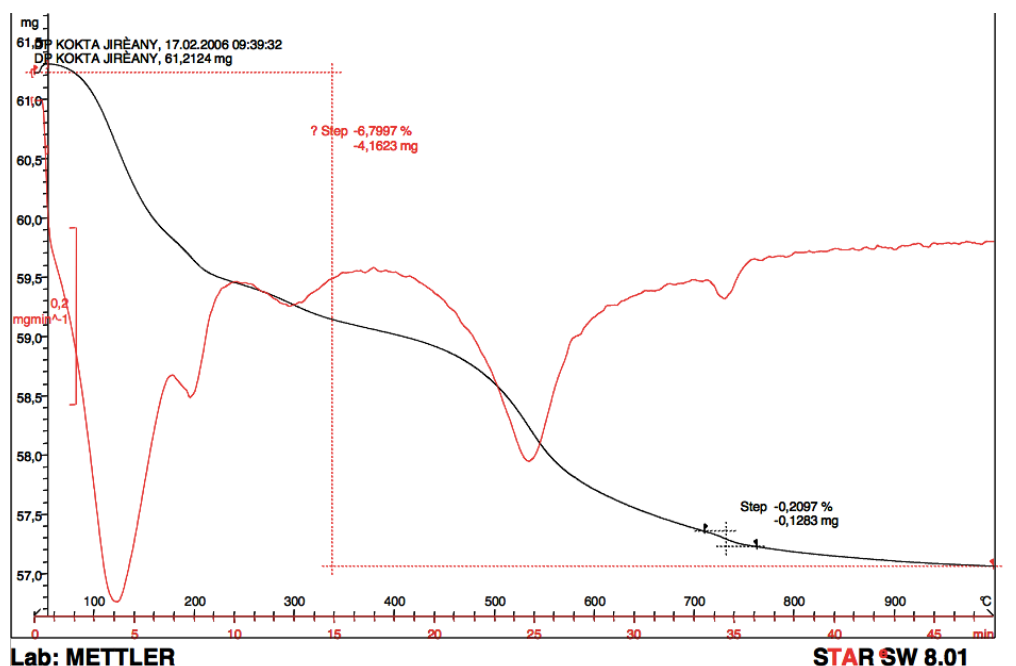
ZŽ ztráta žiháním

Mineralogické složení zeminy zjištěné RTG analýzou: montmorillonit, kaolinit, illit, křemen, živce. Přítomnost montmorillonitu naznačuje, že u zeminy by mohlo dojít k značnému smrštění při sušení, které by mohlo mít vliv na tvar Bigotovy křivky. Mezi základním trojvrstvím jsou adsorbovány kationty (Ca^{2+} , Na^{2+} , Mg^{2+}), které jsou obklopeny vrstvami vody zvyšujícími vzdálenost základních trojvrstev. Montmorillonity z tohoto důvodu při zvýšení vlhkosti bobtnají a naopak se při sušení značně smršťují. Trojvrstvý illit, který je v zemině také přítomen, na rozdíl od montmorillonitu nebobtná. Kaolinit, jehož obsah byl RTG analýzou také zjištěn, je tvořen dvěma vrstvami jílových minerálů a jeho smrštění není tak nebezpečné jako u montmorillonitu. [1]



Obr. č. 16: RTG zemina Jirčany

Zdroj: [13]



Obr. č. 17: DTA zemina Jirčany

Zdroj: [13]

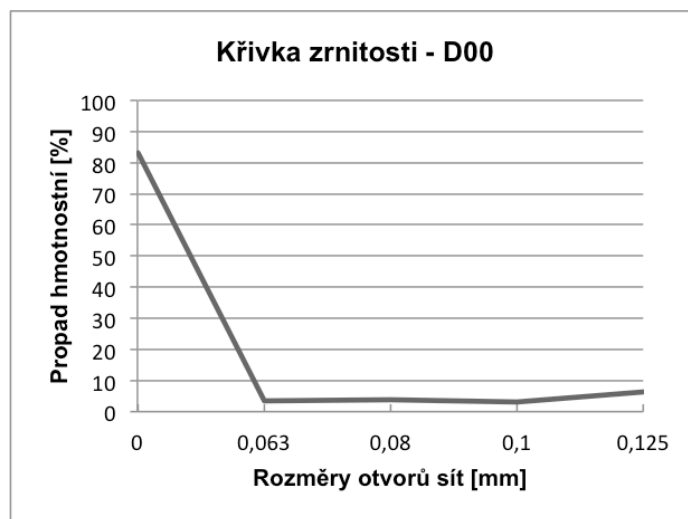
Z DTA analýzy vyplývá, že při teplotě 80 - 100 °C dochází k odchodu fyzikálně vázané vody. V rozmezí teplot 500 - 550 °C dochází k dehydroxilaci jílových minerálů a při teplotě asi 750 °C se rozkádá vápenec.

4.1.3 Ostřivo

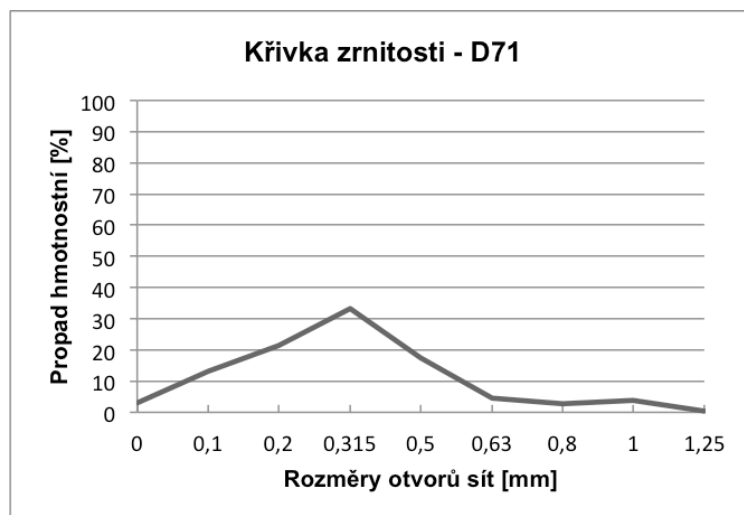
Jako ostřivo byla u vzorků v experimentální části při posuzování vlivu ostřiva použita hornina fylit, kterou pro svoji činnost využívá firma Revlan s.r.o., která se zabývá výrobou břidlicových obkladů, dlažeb a barevných písků. Firma nabízí jako odpadní produkt v různých frakcích namletý fylit a čedič, které lze využít v keramické technologii jako ostřiva při výrobě pálených střešních tašek nebo tvarovek. Roční produkce je asi 95 000 tun. Složení fylitu vyplývá z výsledků silikátové analýzy:

Tabulka č. 6: Chemické složení ostřiva

složka	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
[%]	59,06	19,64	5,69	0,91	2,24	1,15	3,05	2,24



Obr. č. 18: Křivka zrnitosti - D00



Obr. č. 19: Křivka zrnitosti - D71

4.1.4 Přísady

Přísada VUPPOR

Chemické přísady VUPPOR 1 a 2 jsou výrobky z devadesátých let minulého století, které vznikly spoluprací Výzkumného ústavu pro petrochemii v Prievidzi a Katedry materiálového inženýrství Stavební fakulty STU v Bratislavě. Jejím cílem bylo ovlivnění některých technologických pochodů a vlastností cihlářské suroviny např:

- zkrácení procesu sušení vlivem poklesu hodnoty citlivosti k sušení
- zkrácení procesu výpalu a snížení teploty výpalu zlepšením difuze plynů v pórovitém systému střepu
- zvýšení dávky vyhořívajících lehkiv už při malé dávce přísady bez vzniku tzv. černého jádra
- snížení hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ keramického střepu už při poměrně nízké dávce

VUPPOR 1 je emulze bílé barvy, vyrobená na bázi kondenzátů aldehydů (vyrobená z produktů ropy). Její hustota je 1140 kg/m^3 a obsah sušiny je 38 %. Přísada je ředitelná vodou a je hygienicky vyhovující. Nevýhodou je vyšší cena a fakt, že v průběhu sušení při teplotě nad 70°C dochází k uvolňování čpavku, proto je její aplikace možná pouze v kanálových nebo tunelových sušárnách. Tento typ byl využit v experimentální části této práce. Předpokladem je, že by přísada měla zvýšit obsah rozdělovací vody a tím vylehčit střep v průběhu sušení a výpalu.

VUPPOR 2 je emulze pískové barvy, vyrobená na bázi nevyužité druhotné suroviny z výroby organických kyselin. Její hustota je 1160 kg/m^3 a obsahuje 54,9 % sušiny. Byla vyrobena s cílem dosažení podobných vlastností jako VUPPOR 1, ale za přijatelnějších cenových a ekologických podmínek a použitelnosti ve všech typech sušáren. [8]

Přísada BioKeram

Další zkoušenou přísadou použitou jako ztekucovadlo byl BioKeram 140 L, výrobek firmy Borregaard. BioKeram 140 L je biopolymerová přísada vyvinutá ke zvýšení kvality keramiky a produktivity keramického průmyslu.

Dle provedených studií výrobce při použití produktu dochází ke snížení vlhkosti o 10 %, dále ke zvýšení mechanické pevnosti cihel a neutralizaci rozpustných solí.

Jako důsledek výše uvedených výhod výrobku BioKeram 140 L lze pozorovat úsporu nákladů na sušení, jenž odpovídá snížení obsahu vody o 10 %, až o polovinu méně rozbitých cihel a konečně také náhradu uhlíčitanu barnatého přidávaného proti tvorbě výkvětů.

4.2 Příprava zkušebních vzorků

Po namletí zeminy v kulovém mlýně byly naváženy jednotlivé suché směsi pro přípravu vzorků. Homogenizace suchých složek byla provedena v laboratorním homogenizátoru po dobu 60 minut. Poté byly směsi ručně zpracovány s přídavkem vody (případně přísady) tak, aby byla u vyrobených těst dodržena stejná plasticita (0,6 podle Pfefferkorna). Výjimku tvořily pouze směsi pro přípravu vzorků, u nichž byl sledován vliv vlhkosti na vlastnosti plastického těsta. U těchto vzorků se hodnota deformačního poměru pohybovala v rozmezí 0,45 až 0,75.

4.3 Zkoušky plastického těsta

4.3.1 Plasticita těsta podle Pfefferkorna

Plasticita vytvářecích těst byla stanovována na základě deformačního poměru na Pfefferkornově přístroji (ČSN 72 1074). Z keramického těsta byly vyrobeny zkušební válečky o průměru $33 \pm 0,5$ mm a výšky $40 \pm 0,1$ mm s určitým množstvím vlhkosti (rozdělovací vody). Zkušební přístroj (obr. č. 21) se pomocí stavěcích šroubů vyrovnal do vodorovné polohy. Vytvořené zkušební těleso bylo postaveno na podložku a bylo na něj volně spuštěno závaží o hmotnosti 1200 g z výšky $h_0 = 185$ mm. Poté byla změřena výška deformovaného tělesa. Výpočet deformačního poměru dle vztahu:

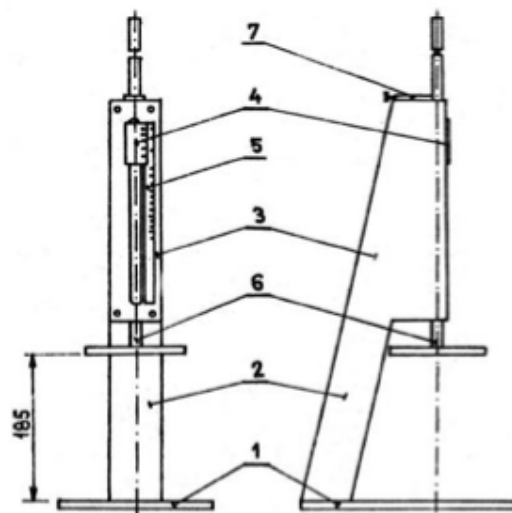
$$d = \frac{h_n}{h_0} \quad [-], \text{ kde}$$

h_n výška válečku po deformaci [mm]

h_0 výška válečku před deformací [mm]

d deformační poměr [-]

[9] [10]



Obr. č. 20 : Schéma Pfefferkornova přístroje podle ČSN 72 1074

Legenda: 1 - podložka, 2 - nosný rám, 3 - uložení vodící tyče, 4 - nonius, 5 - milimetrová stupnice, 6 - vodící tyč s padací deskou, 7 - aretační šroub

Zdroj: [10]



Obr. č. 21: Pfefferkornův přístroj

4.3.2 Skutečná vlhkost těsta w_r

Vzorky byly po vytvoření zváženy s přesností na 0,01 g a po procesu sušení ve zkušební aparatuře byly dosušeny v sušárně při 110 °C do konstantní hmotnosti. Takto vysušené vzorky se opět zvážily a dle daného vztahu byla vypočtena skutečná vlhkost těsta.

$$w_r = \frac{m_z - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%], \text{ kde}$$

w_r skutečná vlhkost těsta [%]

m_z hmotnost vzorku po vytvoření [g]

m_s hmotnost vzorku vysušeného při 110 °C [g]

4.4 Sušení vzorků

Metodou podle Bigota (ČSN 72 1565 - 11) [11] byla na zkušebních cihelkách stanovena kritická vlhkost w_k a koeficient citlivosti k sušení CSB. Vytvořený vzorek byl po vyjmutí z formy umístěn do zkušební aparatury připojené k PC. Aparatura (obr. č. 22) je tvořena digitální vahou schopnou zaznamenávat kontinuálně úbytky hmotnosti vzorku s přesností 0,01 g a laserovým snímačem, který je pevně umístěn v držáku a sleduje změnu rozměru vzorku na hraně cihleky o délce 50 mm s přesností 0,1 mm, který se vlivem vysoušení smršťuje. Celá tato měřicí aparatura je vložena do sušárny s nastavenou konstantní teplotou sušení 35 °C. Z naměřených hodnot zaznamenaných v PC byla vynesena Bigotova křivka.

$$CSB = \frac{w_r - w_k}{w_k} \quad [-]$$

w_r skutečná vlhkost těsta [%]

w_k kritická vlhkost těsta [%]

CSB koeficient citlivosti k sušení podle Bigota [-]



Obr. č. 22: Zkušební aparatura

4.5 Vytváření zkušebních těles z plastického těsta

Pro praktické zkoušky vysoušení keramických těles byly v této práci vytvářeny normalizované zkušební vzorky (ČSN 72 1565 - 4) o rozměrech 100 x 50 x 20 mm (velká cihelka). Byly zhotovovány v kovové formě (obr. č. 23) pomocí ručního vytváření. Dno formy se vyložilo mírně ovlhčeným papírem o stejném rozměru a kraje formy byly lehce potřeny olejem. Z těsta se odebrala objemově větší a tvarově podobná část, která se vtlačila do formy. Po přikrytí povrchu PVC fólií bylo údery palice po celém povrchu vytvořeno zkušební těleso. Přebytky těsta byly odstraněny odříznutím ocelovým drátem a povrch se vyhladil ovlhčenou stěrkou. Forma se odstranila z podstavce a pomalým pohybem pístu se vytvořená cihelka vytlačila z formy. Opřením delší strany cihelky o rovný povrch hrany stolu se cihelka oddělila ode dna formy. Nakonec byl opatrně odstraněn podložní papírek.

[9]



Obr. č. 23: Vytvářecí forma

4.6 Vyrobené směsi

Celkově bylo na posouzení vlastností plastického těsta a tvar Bigotovy křivky namícháno 11 směsí. U každé směsi byla stanovována skutečná vlhkost těsta w_r , hodnota vlhkosti kritického bodu w_k , zjišťován koeficient citlivosti k sušení podle Bigota (CSB) a délka smrštění sušením (DS).

Tabulka č. 7: Vyrobené směsi - v % hmotnostních

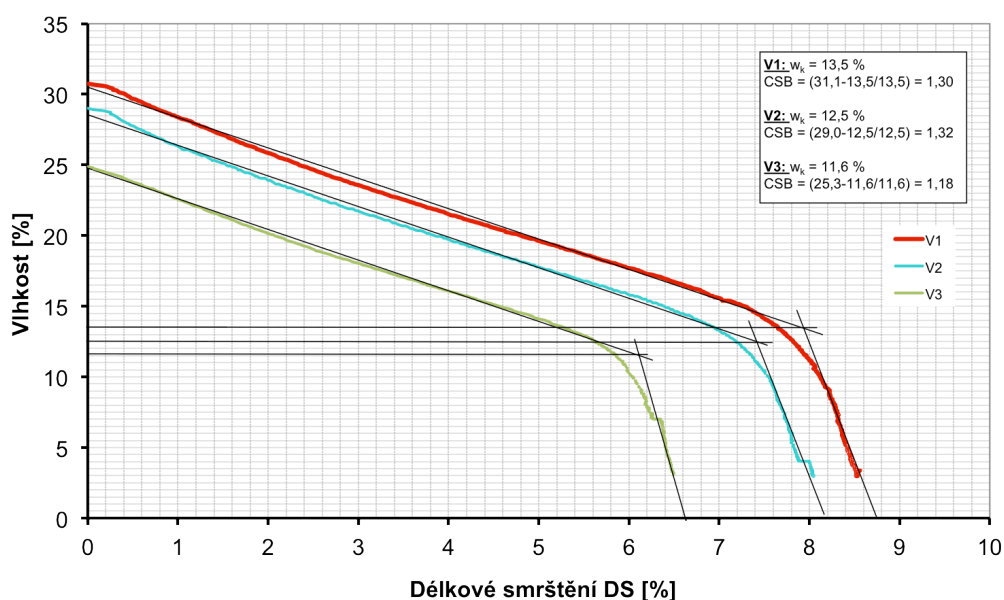
OZN	zemina Jirčany [%]	ostřivo [%]	mn. přísady [g]
V1	100	-	-
V2	100	-	-
V3	100	-	-
D00-1	85	15	-
D00-2	70	30	-
D00-3	55	45	-
D71-1	85	15	-
D71-2	70	30	-
D71-3	55	45	-
BioKeram	100	-	1,8
VUPPOR	100	-	1,8

Vzorky s označením V1, V2, V3 byly vytvářeny pro sledování vlivu vlhkosti na výše uvedené vlastnosti.

Pro určování vlastností plastického těsta s přídavkem ostřiva bylo vyrobeno 6 vzorků. Vzorky s označením D00-1, D00-2, D00-3 obsahovaly jemnější frakci a vzorky D71-1, D71-2, D71-3 hrubější frakci fylitu, který byl použit jako ostřivo.

Příklady (BioKeram, VUPPOR) byly dávkovány hmotnostně a poté rozmíchány v rozdělovací vodě. Dávkování bylo v rozmezí doporučeném výrobcem, 1 % hmotnosti navážky, která činila 180 g.

4.7 Vyhodnocení výsledků



Obrázek č. 24: Bigotovy křivky - vliv vlhkosti

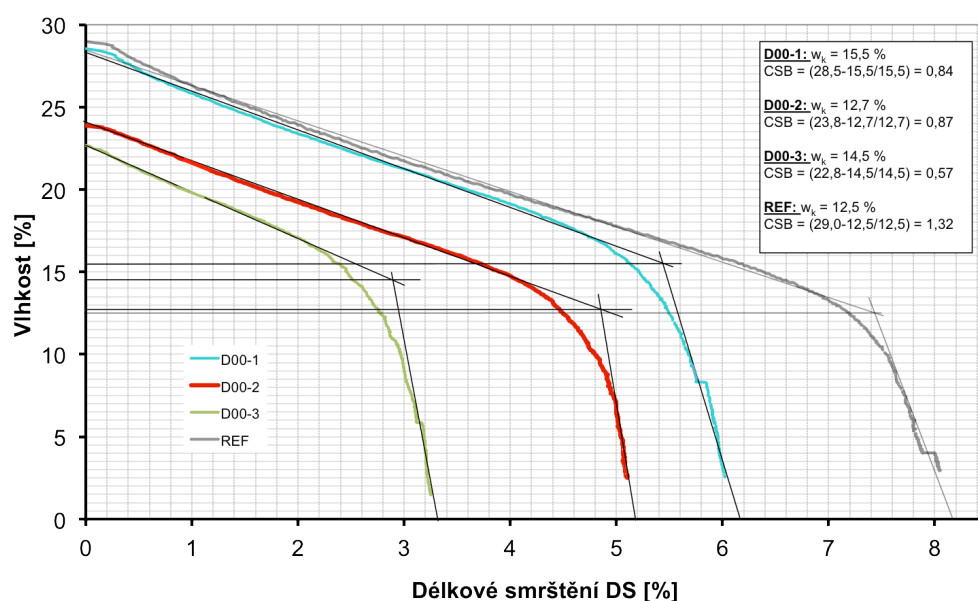
Tabulka č. 8: Naměřené a vypočtené hodnoty - vliv vlhkosti

OZN	def. poměr [-]	w_r [%]	w_k [%]	CSB [-]	DS [%]
V1	0,45	31,1	13,5	1,30	-8,40
V2	0,6	29,0	12,5	1,32	-7,92
V3	0,75	25,3	11,6	1,18	-6,30

V1-3: U vzorků V1, V2 a V3 podle předpokladu s klesající vlhkostí klesá i smrštění, došlo také ke klesání kritické vlhkosti a množství smršťovací vody.

Podle koeficientu CSB je zemina středně citlivá k sušení, ale CSB nesleduje trend w_r a w_k , rozdíl však není příliš výrazný a může být způsoben subjektivní interpretací Bigotovy křivky.

Pro znázornění vlivu příměsí a přísad na tvar Bigotovy křivky byla do následujících grafů přidána referenční křivka (REF) z obr. č. 24 (V2) vzorku tvořeného z plastického těsta při deformačním poměru 0,6.



Obrázek č. 25: Bigotovy křivky - ostřívo D00

Tabulka č. 9: Naměřené a vypočtené hodnoty - vliv ostřiva D00

OZN	zemina Jirčany [%]	ostřívo [%]	def. poměr [-]	w_r [%]	w_k [%]	CSB [-]	DS [%]
D00-1	85	15	0,6	28,5	15,5	0,84	-5,80
D00-2	70	30	0,6	23,8	12,7	0,87	-4,94
D00-3	55	45	0,6	22,8	14,5	0,57	-3,40

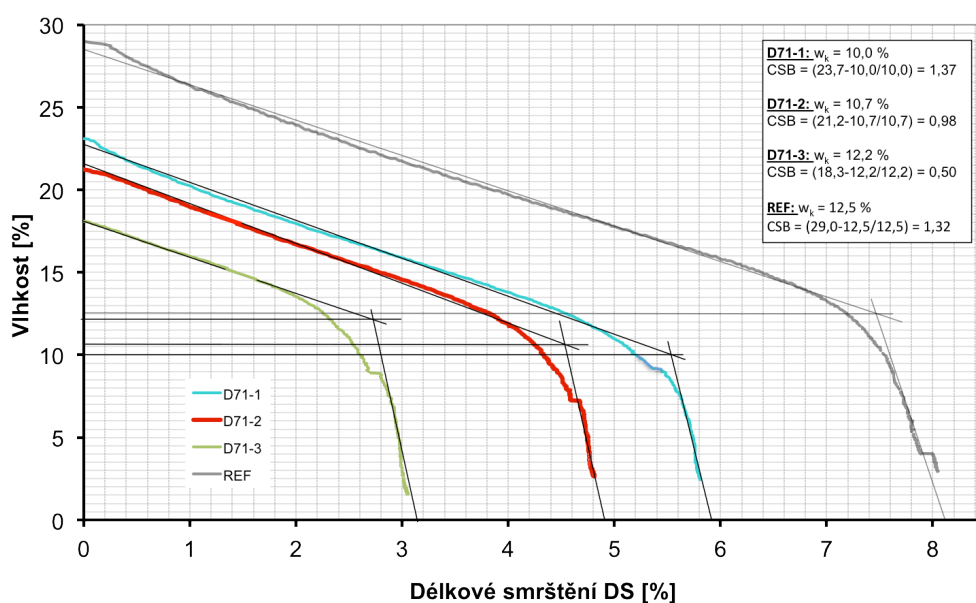
D00: Přídavek 15 % ostřiva nemá vliv na množství rozdělovací vody, ale vyšší přídavky 30 a 45 % už snižují záměsovou vodu.

Přídavek ostřiva se pozitivně projevuje na smrštění sušením a CSB – zemina spadá do kategorie zemin málo citlivých k sušení, výraznějšího poklesu CSB je

dosaženo použitím 45 % ostřiva, hodnoty u 15 a 30 % se hodnoty navzájem příliš neliší.

Opět lze pozorovat snižující se množství smršťovací vody při zvýšení dávky ostřiva.

Ve srovnání s referenčním vzorkem obsahující pouze zeminu Jirčany, dosahují vzorky výhodnějších vlastností z hlediska sušení.



Obrázek č. 26: Bigotovy křivky - ostřivo D71

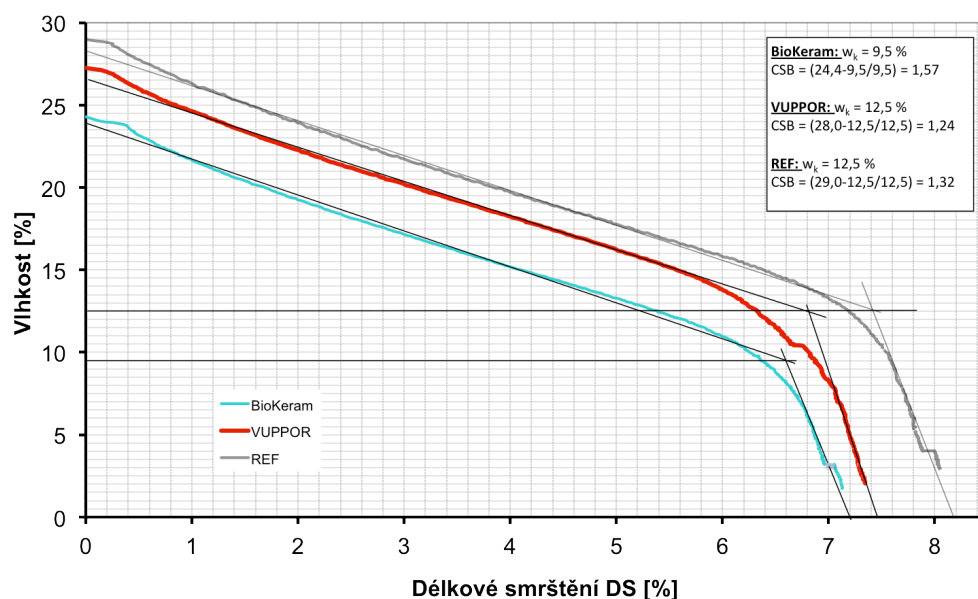
Tabulka č. 10: Naměřené a vypočtené hodnoty - vliv ostřiva D71

OZN	zemina Jirčany [%]	ostřivo [%]	def. poměr [-]	w _r [%]	w _k [%]	CSB [-]	DS [%]
D71-1	85	15	0,6	23,7	10,0	1,37	-5,86
D71-2	70	30	0,6	21,2	10,7	0,98	-4,56
D71-3	55	45	0,6	18,3	12,2	0,50	-3,20

D71: Použitím hrubší frakce ostřiva dochází k ještě výraznějšímu poklesu množství záměsové vody. Přídavek 45 % snižuje obsah vody pod 20 % jako jediný ze všech zkoušených vzorků. U tohoto vzorku je dosaženo nejnižšího CSB a také nejnižšího smrštění sušením.

Ve srovnání se vzorky D00 lze pozorovat, že při dávkování ostřiv 15 a 30 % působí lépe ostřivo jemnější. Vzorek s D71-1 spadá do oblasti zemin středně

citlivých k sušení, CSB je stejné jako u referenčního vzorku, u vzorku D71-2 je hodnota CSB hraniční. To může být způsobeno tím, že hrubší zrna ostřiva jsou příliš rozptýlena v jílové matici a tím nejsou schopna vytvořit dostatečně hustou kostru, která by zabránila smršťování zrn jílových minerálů.

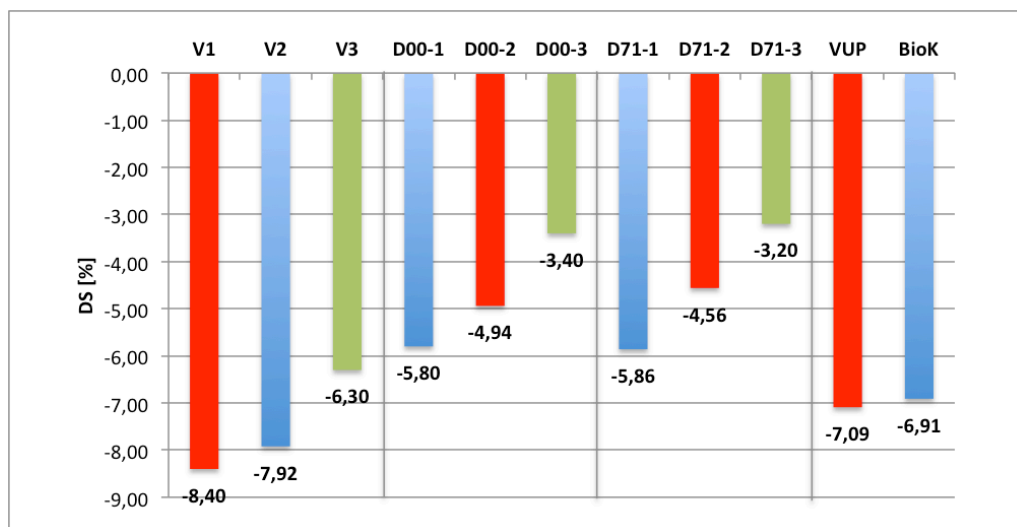


Obrázek č. 27: Bigotovy křivky - přísady

Tabulka č. 11: Naměřené a vypočtené hodnoty - vliv přísad

OZN	dávka přísady [g]	def. poměr [-]	w _r [%]	w _k [%]	CSB [-]	DS [%]
BioKeram	1,8	0,6	24,4	9,5	1,57	-6,91
VUPPOR	1,8	0,6	28,0	12,5	1,24	-7,09

Přísady: Přísada Biokeram sice sníží množství rozdělovací vody, ale příliš neovlivňuje smrštění sušením, dokonce zvyšuje CSB, vzorek zapadá do kategorie zemin citlivých k sušení. Přísada VUPPOR neměla výraznější vliv na žádnou z posuzovaných vlastností, podobnou hodnotou CSB jako vzorky vytvořené pouze přidavkem vody bez přísady patří do skupiny zemin středně citlivých k sušení.



Obrázek č. 28: Grafické srovnání délkové změny sušením

Z grafického srovnání lze poměrně jasně pozorovat, že u všech zkoušených vzorků dochází se snižováním množství rozdělovací vody k menší délkové změně sušením. Vzorky s přísadou mají hodnotu smrštění velmi podobnou, z hlediska smrštění tedy vychází lehce výhodněji přísada BioKeram.

Tabulka č. 12: Srovnání CSB, DSI-B

OZN	CSB [-]	DSI-B [-]
V1	1,30	1,48
V2	1,32	1,31
V3	1,18	0,86
D00-1	0,84	0,75
D00-2	0,87	0,55
D00-3	0,57	0,28
D71-1	1,37	0,80
D71-2	0,98	0,48
D71-3	0,50	0,20
BioK	1,57	1,03
VUPP	1,24	1,10

Srovnáním výpočtů koeficientů citlivosti k sušení podle Bigota CSB a indexu citlivosti k sušení DSI-B (podle vztahu z 3.6.2) lze pozorovat, že DSI-B na rozdíl od CSB sleduje trend klesání obsahu vlhkosti ve vzorcích (s klesající vlhkostí klesá hodnota DSI-B). Jako nejméně citlivý vzorek podle obou metod výpočtu vychází D71-3, který obsahuje 45% podíl ostrůva.

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo popsat a uvést vlastnosti plastických keramických těst stanovitelných pomocí Bigotovy křivky, která popisuje závislost mezi smrštěním a vlhkostí každé keramické suroviny. Metodou analýzy dostupné odborné literatury byly popsány klasické přístupy stanovení kritické vlhkosti w_k a koeficientu citlivosti k sušení CSB, které lze pomocí Bigotovy křivky určit. Uvedeny jsou také výsledky studií zahraničních autorů, ze kterých vyplývají podobné závěry jako ty popsané v této práci, tj. že na tvar Bigotovy křivky a velikost smrštění sušením mají vliv obsah vlhkosti a různá aditiva přidávaná do plastického těsta, zejména ostřiva.

Dílním cílem byla také analýza historie Bigotovy křivky. Tohoto cíle nebylo bohužel z důvodu nedostupnosti literárních pramenů z velké části dosaženo. Prostudování originálních dokumentů by jistě zasluhovalo větší prostor k rozpracování v rámci samostatné práce zaměřené právě na historii vzniku Bigotovy křivky.

V rámci experimentální části práce byly použity zemina Jirčany. S touto zeminou byly provedeny zkoušky posuzující vliv vlhkosti plastického těsta, obsahu ostřiva a přítomnosti přísad na tvar Bigotovy křivky a na hodnotu citlivosti k sušení. Jako ostřivo byla využita hornina fylit namletá na dvě frakce. Přísadami byly přípravky BioKeram a VUPPOR.

Při určování vlivu vlhkosti se potvrdil předpoklad, že se zvyšujícím se obsahem vlhkosti v plastickém těstě narůstá i jeho smrštění sušením. Vzorky vyrobené pouze ze zeminy s různým obsahem vody dosahovaly největších smrštění. Míra plasticity vzorků byla určována deformačním poměrem podle Pfefferkorna. Největší smrštění sušením měl vzorek V1 (8,40 %) s nejvyšším obsahem vlhkosti 31,1 %. Smrštění a hodnota kritické vlhkosti w_k klesaly se snižujícím se obsahem vody. Vzorky V1, V2 a V3 jsou dle CSB zařazeny do skupiny zemin středně citlivých k sušení.

S přidavkem ostřiva D00 lze u zkoušené zeminy pozorovat snížení hodnoty smrštění a citlivosti k sušení. U dávky 45 % došlo k výraznějšímu poklesu CSB (0,57), všechny vzorky s obsahem ostřiva D00 patří do zemin málo citlivých k sušení. Při zvyšující se dávce ostřiva došlo ke snížení obsahu rozdělovací vody.

V porovnání se vzorky tvořenými pouze zeminou dosahují vzorky z hlediska sušení výhodnějších vlastností.

Vzorek D71-3 s 45% obsahem ostřiva dosáhl nejmenšího smrštění (3,20 %) ze všech zkoušených vzorků. Obsahoval také nejméně rozdělovací vody (18,3 %). U ostřiva D71 lze pozorovat snížení vlhkosti u všech vzorků, hodnoty smrštění jsou však podobné jako u jemnějšího ostřiva D00. U dávek 15 a 30 % si to lze vysvětlit přílišným rozptýlením zrn ostřiva v jílové matici. Vzorek D71-1 hodnotou 1,37 zapadá do oblasti zemin středně citlivých, vzorky D71-2 a D71-3 do oblasti zemin málo citlivých k sušení.

Vlivem přítomnosti přísady BioKeram došlo sice ke snížení obsahu vlhkosti u zkoušeného vzorku, ale přísada příliš neovlivňuje smrštění a dokonce zvyšuje hodnotu CSB (1,57 - zeminy citlivé k sušení). Příklad VUPPOR zásadně žádnou sledovanou vlastnost neovlivnila. K dosažení požadované plasticity potřebovala podobné množství vlhkosti jako referenční vzorky tvořené pouze zeminou Jirčany. Na rozdíl od referenčního vzorku dosáhla o trochu menšího smrštění (7,09 %). Vzorek spadá do skupiny zemin středně citlivých k sušení.

Bigotova křivka je výhodným a poměrně jednoduchým nástrojem pro posuzování vlastností plastického keramického těsta. S její pomocí lze určit kritický bod vlhkosti, z kterého vychází koeficient citlivosti k sušení CSB, jehož znalost je důležitým prvkem v procesu sušení keramických výrobků.

Jako výhodné a funkční ostřivo se projevil namletý fylit. Jak se prokázalo u vzorků jeho přidávkem, došlo k redukci množství rozdělovací vody a snížení smrštění, zemina se stává málo citlivou k sušení. Výhodným hlediskem z ekonomického i ekologického pohledu se stává i fakt, že se jedná o odpadní produkt.

Seznam použité literatury

- [1] SOKOLÁŘ, R. *Keramika – Modul BJ04 M01*. Brno: VUT FAST, 2006. 176 s.
- [2] PYTLÍK, P. *Cihlářství*. 1. vyd. Brno: CERM, 1995. 264 s. ISBN 80-214-0612-7.
- [3] SOKOLÁŘ, R., SMETANOVÁ, L. *Keramika-laboratoře/Modul BJ02/M01*. Brno: VUT FAST, 2006.
- [4] KORNMANN, M. *Clay bricks and roof tiles, Manufacturing and properties*. 1. vyd. Paris - France: Société de l'industrie minérale, 2007. 308 s. ISBN 2-9517765-6-X.
- [5] HANYKÝŘ, V., KUTZENDÖRFER, J. *Technologie keramiky*. 1. vyd. Hradec Králové: Vega, 2000. 287 s. ISBN 80-900860-6-3.
- [6] VIEIRA, Carlos Maurício Fontes. *Avaliação da Secagem de Cerâmica Vermelha Através da Curva de Bigot*. Cerâmica Industrial. 2003 [cit. 7.4.2014]. Dostupné z: http://brasenic.com.br/bigot/bigot_3.pdf [online]
- [7] AUNGATICHART, P., SHIGETAKA, W. *Correlation between Bigot and Ratzenberger drying sensitivity indices of red clay from Ratchaburi province (Thailand)*. Applied Clay Science. 2009, roč. 43, č. 2.
- [8] ŠVEDA, M. Chemická přísada VUPPOR 2. *Keramický zpravodaj*. 2011, roč. 27, s. 11-15.
- [9] SOKOLÁŘ, R., NEVŘISOVÁ, L., VODOVÁ, L., GRYGAROVÁ, S. *Žárovzdorné jíly v ČR a metodika posuzování jejich vlastností*. 1. vyd. Brno: CERM, 2012. 183 s. ISBN 978-80-7204-817-5
- [10] ČSN 72 1074 - *Stanovení optimální a pracovní vlhkosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem*. 1985
- [11] ČSN 72 1565 - 11 - *Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení maximální porovnávací rychlosti nezávadného sušení. Stanovení kritické vlhkosti*. 1985
- [12] SVOBODOVÁ, M. *Charakteristika cihlářských zemin používaných pro výrobu tepelně izolačních tvarovek typu THERM*. Bakalářská práce. VUT FAST Brno, 2013.

[13] VONDŘÍČKOVÁ, V. *Uplatnění kamenné prosívky jako ostřiva ve střepu pálených střešních tašek*. Diplomová práce. VUT FAST Brno, 2012.

Seznam použitých tabulek a obrázků

Tabulky

Tabulka č. 1: Vliv složení těsta na smrštění sušením [4]	26
Tabulka č. 2: Složení záměsí v % hmotnosti [7].....	31
Tabulka č. 3: Hodnoty M_i , M_c , DS , $DSI-B$ [7]	32
Tabulka č. 4: Naměřené a vypočtené hodnoty zemin A -F [12]	35
Tabulka č. 5: Chemické složení zeminy Jirčany - procentuální zastoupení prvků ..	37
Tabulka č. 6: Chemické složení ostřiva	38
Tabulka č. 7: Vyrobené směsi - v % hmotnostních	45
Tabulka č. 8: Naměřené a vypočtené hodnoty - vliv vlhkosti	46
Tabulka č. 9: Naměřené a vypočtené hodnoty - vliv ostřiva D00	47
Tabulka č. 10: Naměřené a vypočtené hodnoty - vliv ostřiva D71	48
Tabulka č. 11: Naměřené a vypočtené hodnoty - vliv přísad	49
Tabulka č. 12: Srovnání CSB, DSI-B	50

Obrázky

Obr. č. 1: Rozdělení jílovinových zemin dle granulometrie [1]	13
Obr. č. 2: Atomové uspořádání Si-O tetraedru (A) a Al-O-OH oktaedru (B) [1]	14
Obr. č. 3: Úseky sušení I-III, a smršťování - fáze 1,2 a části (a, b, c, d); W_{K1} - 1. kritický bod, W_{K2} - 2. kritický bod, W_h - hygroskopická vlhkost (vlhkost výsušku při rovnovážném stavu s okolní atmosférou o relativní vlhkosti 100 %) [1].....	19
Obr. č. 4: Bigotova křivka, závislost smrštění sušením S_s na vlhkosti W [5]	22
Obr. č. 5: Stanovení kritické vlhkosti W_k [3]	23
Obr. č. 6: Bigotova křivka [3]	24
Obr. č. 7: Upravený Winklerův diagram [1]	27
Obr. č. 8: Granulometrické zastupení základních surovin [6]	28
Obr. č. 9: Bigotova křivka, směs bez přidání písku (M0A) [6]	28

Obr. č. 10: Bigotova křivka, směs s přidáním 5 % písku (M5A) [6]	29
Obr. č. 11: Bigotova křivka, směs s přidáním 10 % písku (M10A) [6]	29
Obr. č. 12: Bigotova křivka, směs s přidáním 15 % písku (M15A) [6]	29
Obr. č. 13: Bigotova křivka, směs s přidáním 20 % písku (M20A) [6]	30
Obr. č. 14: Závislost smrštění sušením na vlhkosti - všechny záměsi [7]	33
Obr. č. 15: Bigotovy křivky vybraných zemin A - F [12]	34
Obr. č. 16: RTG zemina Jirčany [13]	37
Obr. č. 17: DTA zemina Jirčany [13]	38
Obr. č. 18: Křivka zrnitosti - D00	39
Obr. č. 19: Křivka zrnitosti - D71	39
Obr. č. 20: Schéma Pfefferkornova přístroje podle ČSN 72 1074 [10]	42
Obr. č. 21: Pfefferkornův přístroj	42
Obr. č. 22: Zkušební aparatura	44
Obr. č. 23: Vytvářecí forma	45
Obr. č. 24: Bigotovy křivky - vliv vlhkosti	46
Obr. č. 25: Bigotovy křivky - ostřívo D00	47
Obr. č. 26: Bigotovy křivky - ostřívo D71	48
Obr. č. 27: Bigotovy křivky - přísady	49
Obr. č. 28: Grafické srovnání délkové změny sušením	50